

**DESPACHO ECONÓMICO DINÁMICO CONSIDERANDO LA  
INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA  
(SAE) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL USO EFICIENTE DE  
ENERGÍA RENOVABLE**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA:  
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
DESPACHO ECONÓMICO DINÁMICO CONSIDERANDO LA  
INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA  
(SAE) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL USO EFICIENTE DE  
ENERGÍA RENOVABLE**

**AUTOR:  
ISIDRO SANTIAGO REINOSO SACANCELA**

**DIRECTOR:  
ALEX DAVID VALENZUELA SANTILLÁN**

**Quito, julio 2021**

Isidro Santiago Reinoso Sacancela

**DESPACHO ECONÓMICO DINÁMICO CONSIDERANDO LA  
INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA  
(SAE) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL USO EFICIENTE DE  
ENERGÍA RENOVABLE**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2021

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña histórica e información de contacto.



**Isidro Santiago Reinoso Sacancela** (Y'1992). Realizó sus estudios de nivel secundario en el Colegio Técnico Salesiano Don Bosco. Egresado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Politécnica Salesiana. Su trabajo se fundamenta en el desarrollo de modelo de optimización para abastecer la demanda eléctrica integrando sistemas de almacenamiento de energía y aprovechando la optimización de los recursos renovables no convencionales. [ireinosos@est.ups.edu.ec](mailto:ireinosos@est.ups.edu.ec)

*Dirigido por:*



**Alex David Valenzuela Santillán** (Y'1989). Realizó sus estudios superiores en la Escuela Politécnica Nacional de Quito, donde se graduó de Ingeniero Eléctrico en diciembre 2013, Además realizó estudios de maestría en Newcastle University en Reino Unido, donde obtuvo el título en Power Distribution Engineering MSc. Actualmente es profesor ocasional a tiempo completo en la Universidad Politécnica Salesiana. [avalenzuela@ups.edu.ec](mailto:avalenzuela@ups.edu.ec)

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS  
©2021 Universidad Politécnica Salesiana  
QUITO - ECUADOR

## **DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR**

Yo, Alex David Valenzuela Santillán declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *DESPACHO ECONÓMICO DINÁMICO CONSIDERANDO LA INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (SAE) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL USO EFICIENTE DE ENERGÍA RENOVABLE* realizado por Isidro Santiago Reinoso Sacancela, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerado como trabajo final de titulación.

Quito D.M., julio de 2021



.....

Alex David Valenzuela Santillán

C.C.: 172184864-4

## CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Isidro Santiago Reinoso Sacancela, con documento de identificación N° 1724140486, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de grado/titulación intitulado: *DESPACHO ECONÓMICO DINÁMICO CONSIDERANDO LA INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (SAE) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL USO EFICIENTE DE ENERGÍA RENOVABLE*, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, D.M., julio de 2021



.....

Isidro Santiago Reinoso Sacancela

C.C.: 1724140486

## ***ÍNDICE GENERAL***

Introducción .....	2
2 Marco teórico .....	4
2.1 Planificación de la generación.....	4
2.2 Despacho económico.....	6
2.3 Sistemas de Almacenamiento de energía .....	7
2.4 Generación con energía renovable integrando almacenamiento con baterías.....	9
3 Modelado matemático .....	10
3.1 Generalidades .....	11
3.2 Formulación matemática .....	11
4 Implementación del Modelo Matemático.....	15
4.1 Parámetros .....	15
4.2 Procedimiento de resolución .....	17
4.3 Casos de estudio .....	18
5 Análisis de resultados.....	19
5.1 Caso uno .....	19
5.2 Caso dos .....	21
6 Conclusiones .....	23
6.1 Trabajos futuros.....	24
7 Referencias .....	25
7.1 Matriz de Estado del Arte.....	29
7.2 Resumen de Indicadores.....	34

## ***ÍNDICE DE FIGURAS***

Figura 1. Energías renovables y sistemas de almacenamiento en el SEP. ....	3
Figura 2. Pautas para la operación y despacho. ....	6
Figura 3. Despacho económico. ....	6
Figura 4. Ventajas del almacenamiento de energía con baterías. ....	9
Figura 5. Factores de uso de los generadores que usan recursos renovables. ....	17
Figura 6. Demanda horaria. ....	18
Figura 7. Despacho horario por tipo de tecnología. ....	20
Figura 8. Porcentaje de participación energética por tecnología. ....	20
Figura 9. Costos del sistema por tecnología. ....	21
Figura 10. Despacho horario por tipo de tecnología incluido el SAEB. ....	21
Figura 11. Bloques de energía destinados a la demanda con SAEB. ....	22
Figura 12. Estado de carga del SAEB. ....	22
Figura 13. Carga y descarga del SAEB. ....	22
Figura 14. Costos por tipo de tecnología incluido el SAEB. ....	23
Figura 15. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte. ....	34
Figura 16. Indicador de formulación del problema - Estado del arte. ....	35
Figura 17. Indicador de solución - Estado del arte. ....	35



## ***ÍNDICE DE TABLAS***

Tabla 1. Tecnologías de almacenamiento de energía.....	8
Tabla 2. Datos técnicos las unidades térmicas e hidráulicas.....	15
Tabla 3. Parámetros técnicos de la generación con energía renovable. ....	15
Tabla 4. Asignación de tecnología del sistema de generación.....	16
Tabla 5. Coeficientes de cada generador para función de costos.....	16
Tabla 6. Parámetros del SAEB.....	16
Tabla 7. Factores de uso de los generadores que usan recursos renovables. ....	16
Tabla 8. Algoritmo de resolución.....	17
Tabla 9. Demanda horaria. ....	18
Tabla 10. Despacho por tipo de tecnología. ....	19
Tabla 11. Energía entregada por tipo de tecnología.....	20
Tabla 12. Costos por tipo de tecnología.....	20
Tabla 13. Despacho por tipo de tecnología incluido SAEB.....	21
Tabla 14. Energía por tipo de tecnología incluido SAEB.....	22
Tabla 15. Costos por tipo de tecnología incluido el SAEB.....	23
Tabla 16. Costos por caso y ahorro.....	23
Tabla 17. Matriz de estado del arte .....	29

# **DESPACHO ECONÓMICO DINÁMICO CONSIDERANDO LA INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (SAE) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL USO EFICIENTE DE ENERGÍA RENOVABLE**

## **Resumen**

Dado el auge de las nuevas tecnologías, se ha motivado la implementación de nuevos servicios relacionados con la implementación de generación con energía renovable, lo cual conlleva a un dinamismo de la curva de carga. Con base a lo citado, el sistema eléctrico tiene que estar preparado para mitigar la variación tanto en la generación como en la demanda, aspecto por el cual es requerente el uso de sistemas de almacenamiento de energía (SAE), lo que permitirá minimizar costos a nivel operativo para el abastecimiento de la demanda y dinamizar el abastecimiento de la demanda.

Por lo citado, el presente trabajo desarrolla un modelo de optimización para determinar el despacho económico dinámico considerando la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía (SAE) en el sistema eléctrico para el uso eficiente de energía renovable, cuyo objeto será minimizar el costo operativo aplicando las restricciones asociadas al abastecimiento de la demanda y las restricciones asociadas a la energía entregada, almacenada y sus límites.

**Palabras Clave:** Almacenamiento de energía, baterías, simulación de sistemas de energía, despacho de generación de energía, fuentes de energía renovables y métodos de optimización.

## **Abstract**

Given the rise of new technologies, the implementation of new services related to the implementation of generation with renewable energy has been motivated, which leads to a dynamism of the load curve. Based on the aforementioned, the electrical system has to be prepared to mitigate the variation in both generation and demand, an aspect for which the use of energy storage systems (SAE) is required, which will minimize costs to operational level to supply demand and boost supply of demand.

Therefore, this work develops an optimization model to determine the dynamic economic dispatch considering the incorporation of energy storage systems (SAE) in the electrical system for the efficient use of renewable energy, whose objective will be to minimize the operating cost by applying the restrictions associated with the supply of demand and the restrictions associated with the energy delivered, stored and their limits.

**Keywords:** Energy storage, Batteries, Power system simulation, Power generation dispatch, Renewable energy sources, and Optimization methods.

# 1 Introducción

Los desasosiegos sobre la contaminación y sus efectos en relación al calentamiento global, la implementación de mecanismos que reduzcan las emisiones de carbono, ha conllevado una gran atención por parte de los países, acción que ha permitido acelerar la utilización de energía limpia [1].

Bajo el precepto antes descrito, gran parte de los países han implementado políticas para producir electricidad mediante el uso de energía renovable limpia para aminorar los efectos potenciales de los gases que causan el efecto invernadero, para lo cual se ha propuesto mecanismos comerciales asociado a este tipo de tecnologías. Por lo citado, a nivel mundial, las investigaciones se han apuntado a determinar una alternativa para la consecución de medios factibles para minimizar el costo de operación y abastecer la demanda de manera económica incursionando en el uso de energías renovables [2].

Como se ha mencionado, la integración de fuentes de generación a base de energía renovable es un factor primordial para reducir la contaminación y crear un entorno competitivo en el mercado eléctrico, es así que, tecnologías como la eólica o fotovoltaica ha incrementado su participación a nivel mundial, ya que su operación reduce las emisiones de gases contaminantes, minimiza el costo asociado al abastecimiento de la demanda y alivia la escasez de energía producida con combustibles fósiles [3]. Sin embargo, este tipo de tecnologías conllevan a la necesidad de efectuar un análisis de aspectos técnicos en relación a las estrategias eficientes de despacho económico (DE) lo que ratificaría aún más la decisión de los gobiernos en incentivar la implementación de proyectos de

generación bajo el uso de energía renovable [4].

Bajo la perspectiva antes mencionada, la planificación para el abastecimiento de la demanda en un sistema eléctrico conlleva a la implementación de centrales de generación eficientes y económicas, en tal sentido la generación de energía eléctrica mediante energía renovable ha sido un desafío en el ámbito de la investigación, enfocándose principalmente análisis a la variación de los recursos primarios usados por la energía renovable [5]. La intermitencia del recurso primario de para la producción de energía eléctrica por parte de los generadores que usan energías renovables, dificultan la planificación y el despacho para el abastecimiento, por tanto, la intensificada penetración de la energía renovable en el sistema eléctrico, también conlleva a determinar las reservas de generación térmica suficientes para satisfacer la demanda de energía y hacer frente a la intermitencia del recurso renovable [6].

Por otra parte, la interacción de los distintos tipos de generadores en un mercado eléctrico competitivo sobrelleva a que los participantes estén al tanto de las tendencias de los precios del mercado del corto y mediano plazo con el objeto de evaluar la viabilidad económica del proyecto considerando, de ser el caso, la incorporación de nuevos elementos que mitiguen la variabilidad en el recurso renovable [7].

Así mismo, la fluctuación en los costos asociados con la inversión de sistemas de generación que usan energías renovables por el tipo de tecnología hace que sea dificultoso para las empresas de generación introducir energía renovable en la red [8]. Como resultado de lo citado, es determinante la mejora del sistema de pronóstico de energía renovable que puede ayudar en gran medida al proceso

de integración que servirán para diseñar planes operativos y evaluar los aspectos comerciales y económicos del sistema [9]; y, como una alternativa complementaria se debe iniciar en el análisis para el uso de sistemas de almacenamiento que brinden de alguna forma un grado de firmeza en la energía que puedan generar los generadores en referencia [10].

Es importante señalar que, la incorporación de un sistema de almacenamiento es relevante para la sostenibilidad para la optimización de la energía eléctrica producida a base de energía renovable; y, en concordancia con el concepto del manejo de incertidumbres del recurso renovable, se ha verificado que los Sistemas de Almacenamiento de Energía (SAE) son adecuados para mitigar los impactos negativos resultantes de la integración de la generación renovable a los sistemas eléctricos [11].

Los sistemas de almacenamiento son diversos, sin embargo, el sistema aplicable para reducir las fluctuaciones de la producción de energía renovable se ha denominado Sistema de Almacenamiento de Energía por Batería (SAEB) por sus siglas en inglés BESS - Battery Energy Storage System [12]. La Figura 1 muestra un parque de generación con energías

renovables conectado a la red con SAEB.

El modelo mostrado consiste en un sistema energético que integra diversos tipos de generadores, siendo entre los principales los térmicos, eólicos, fotovoltaicos y obviamente el sistema de almacenamiento por baterías. Con base a lo citado, el SAEB permite la optimización del recurso renovable en horas cuando la demanda es alta o baja, almacenado o entregando energía al sistema, respectivamente, razón por la cual es necesario la modelación de este sistema híbrido a nivel operativo [13].

En algunos trabajos existentes, los investigadores han mostrado gran interés en incorporar modelos híbridos en el análisis de estrategias de despacho económico, la optimización de la operación de redes con energías renovables y SAEB se ha convertido aspecto a ser analizado. En [14] se propuso un enfoque de FOP para reducir las pérdidas de energía optimizando la entrega de potencia activa y reactiva paralelamente. Los autores de [15] propusieron un problema de optimización de tipo convexo a fin de mejorar el valor del estado de carga del sistema de almacenamiento. En [16] se formuló un problema de optimización

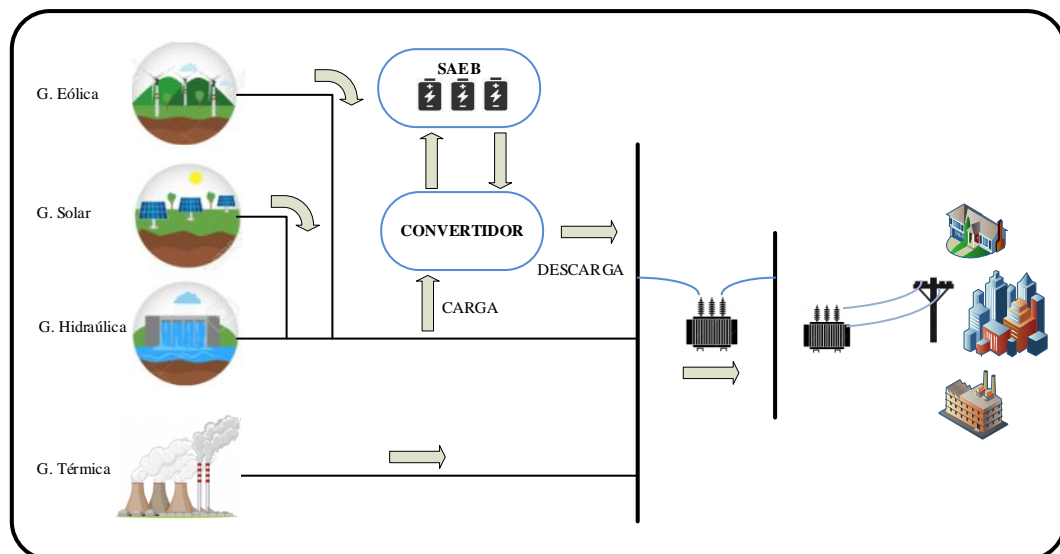


Figura 1. Energías renovables y sistemas de almacenamiento en el SEP [autor].

para gestionar óptimamente el BESS tomando en cuenta el riesgo comercial las transacciones de energía.

El artículo [17] propone una estrategia para la óptima carga y posterior descarga de los BESS para mantener el sincronismo entre la interconexión de sistemas que cuentan con alta introducción de energías renovables. En [18], se analizan las ventajas del almacenamiento en microrredes, fijando la ubicación y dimensionamiento en función de la inversión y costos logísticos. En [19] se presenta un modelo estocástico FOP considerando restricciones operativas y de seguridad del sistema. Por lo citado, el presente trabajo de investigación se enfoca en la realización del despacho económico dinámico considerando la incorporación de los SAEB para el uso eficiente de energía renovable en un parque de generación con diversas tecnologías, por lo tanto, el documento se desarrolla conforme se describe a continuación:

- 1) Sección 2 detalla el sustento teórico técnico dirigido a la planificación de la generación y los sistemas de almacenamiento;
- 2) Esta Sección establece la formulación matemática del problema de optimización para implementar en el despacho económico considerando el SAEB;
- 3) La Sección 4 presenta la aplicación del modelo de optimización desarrollado casos de estudios;
- 4) Con base a sección anterior, en la Sección 5 se exponen los análisis de resultados; resultado de lo cual en su parte final se describen los aspectos concluyentes y se detallan los trabajos futuros.

## **2 Marco teórico**

El presente apartado se presenta detalladamente conceptos relacionados a la investigación, como la planificación de generación, los diferentes tipos de sistemas de almacenamiento, el impacto de la integración de la energía renovable junto con sistemas de almacenamiento al sistema eléctrico y como es el comportamiento en conjunto en el despacho económico, estos argumentos permiten comprender cuán importante es el desarrollo de este trabajo y facilitar el entendimiento del modelo solución planteado y posterior análisis de resultados.

### **2.1 Planificación de la generación**

El planeamiento de operación del sistema eléctrico de potencia se fundamenta en el despacho y operación óptima de las unidades de generación e interconexiones internacionales considerando la capacidad, disponibilidad de las mismas, el uso eficaz de los recursos y los costos de la energía. En base a lo descrito, todas las acciones que se desarrollan en el sistema de potencia dependerán del operador, es así como las disposiciones durante años, meses, días hasta horas se realizan con el único fin de abastecer a la demanda del suministro de energía; considerando que dicho servicio debe cumplir con parámetros de calidad y seguridad, sin interrupciones debido a fallas o causas ajenas, y lo más económicamente posible; esta tarea es compleja debido al tamaño del sistema interconectado de potencia, entre las funciones más relevantes y que lo caracterizan es:

- Flexibilidad para maniobrar el sistema frente a fluctuaciones, fallas del sistema y ajenas a él.

- Planeación estratégica para el manejo de los recursos para la demanda.

Cumplir con lo expuesto es posible al involucrar a paquetes tecnológicos que permiten el análisis de la red y de la demanda para cumplir los deberes de y los plazos que la planificación de operación requiere. La planificación en la generación es el resultado del funcionamiento óptimo del sistema y del estudio de la agregación de nuevas centrales de generación donde las dificultades inician desde la gestión optima del recurso de las unidades de generación, hasta la repartición optima de la carga a las generadoras, para finalmente cumplir con el objetivo de minimizar costos instantáneos, esperados y operativos; con las actuales herramientas computacionales se ha logrado optimizar el proceso de planeación por medio de modelos no lineales y estocásticos, curvas de carga, y considerando periodos con horizontes desde horas y días para un corto plazo, meses para mediano plazo y para un largo plazo un aproximado desde los 5 a los 30 años.

Las acciones dentro del proceso de planificación en función de los plazos de estudio sirven para cumplir con la tarea de determinar la combinación correcta de unidades de generación para cumplir con un óptimo despacho económico, posteriormente se detallan dichas las etapas de planeación y su labor [20], [21].

- Planeación de corto plazo: se consideran las condiciones operativas y limitaciones físicas del sistema para proceder a generar un plan de operación en un periodo de tiempo de horas hasta días (semanas), donde el proceso consiste en un despacho para una demanda pronosticada en el corto

plazo, también llamado predespacho, un despacho consiste es la selección de las unidades de generación disponibles para ingresar en operación y la potencia que entregará a la carga, todo este proceso debe ser óptimo y además debe considerar un porcentaje mínimo reserva para un súbito incremento de demanda [22]–[25].

- Planeación de mediano plazo: adicional al proceso de estudio de corto plazo, para esta etapa se considera además la disponibilidad de los recursos energéticos en función de sus limitantes para evaluar el ingreso de las unidades existentes y si se requiere nueva inversión para el ingreso de nueva generación, todo esto en función de los costos para el despacho en el lapso de tiempo de meses hasta los 3 a 5 años [22], [23], [26] y de la demanda proyectada.
- Planeación a largo plazo: para el tiempo superior al de mediano plazo, la planificación realiza una actividad de despacho en función de la capacidad aproximada requerida para la demanda pronosticada, a los combustibles y caracterización de las unidades de generación, para buscar seguridad en el sistema, minimizar costo en la operación y mantenimiento [27]. En el estudio se considera el abastecimiento en un periodo extendido analizando costos de expansión y el comportamiento del sistema frente a la operación y expansión [28].

En conclusión, las pautas que se ilustran en la Figura 2 para el desarrollo adecuado del proceso de operación y consumir en el despacho económico son:

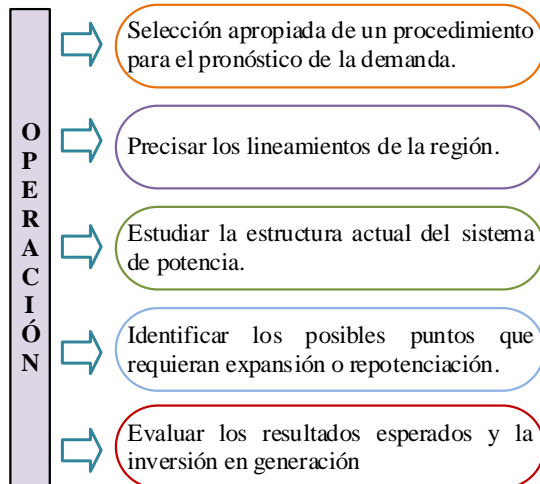


Figura 2. Pautas para la operación y despacho [29].

## 2.2 Despacho económico

El despacho económico es una actividad que considera parámetros del sistema y particularidades y restricciones de las unidades de generación a participar (ubicación, disponibilidad del recurso, costo de operación y mantenimiento, pérdidas, características técnicas y ambientales, etc.), para cumplir con el abastecimiento de la demanda y optimización de costos, técnicamente un despacho adjudica la suma de potencia que las generadoras en función de las características propias en el plazo correspondiente detallado anteriormente [30].

El sector eléctrico requiere de un buen rendimiento económico debido a la inversión destinada del sector público y privado, tarifas eléctricas, operaciones, impacto social y ambiental; por estas razones el despacho económico es complejo y requiere de una gestión óptima y de una base legal de marco regulatorio para condicionar la actividad en el mercado. Por lo tanto, en la planificación y operación las decisiones a tomarse siguen una línea de tiempo desde el largo plazo y se consolida en el corto plazo en

base a modelos de matemáticos complejos que facilitan en alcance de costos mínimos e índices de calidad aptos en el despacho.

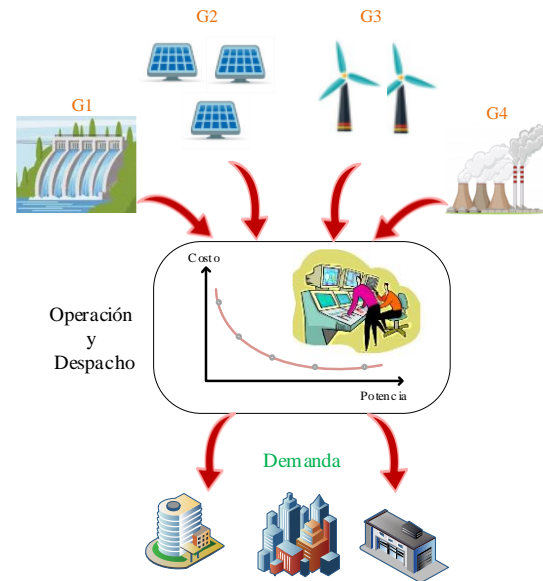


Figura 3. Despacho económico [30].

La ejecución del despacho define la óptima combinación de unidades de generación para satisfacer la demanda en un tiempo definido basado en un análisis económico que minimiza costos de producción y se refleja en el precio reducido para usuario final, así se ilustra en la Figura 3; la carga a abastecerse es surtida por energía disponible en base a una configuración posible vista desde el punto económico sin considerar que tipo de empresa de generación este detrás [31], adicional la mencionada ilustración demuestra la flexibilidad del sistema en la integración de diversas fuentes de energía, que se unen a un nodo común dirigido a la carga, esta actividad se ve reflejada en un precio, que depende de dos condicionamientos: mientras más alto es el costo de operación menor será el consumo de potencia producida al

generador que le corresponda, y mientras mayor sea la producción de potencia mayor es el consumo de la misma, la incorporación de energía limpia (fotovoltaica, eólica, biomasa, etc.) actualmente participan en un despacho preferente por el costo de su operación y por su bajo impacto ambiental, pero parte de ellas tienen un riesgo al provenir de una fuente fluctuante para limitar estos riesgos se usan tecnologías para su aprovechamiento. Por esta razón el presente estudio se enfoca en el uso eficiente de la energía renovable con la incorporación de sistemas de almacenamiento de energía en el despacho económico, donde se evidencia la minimización de costos por el uso de energía renovable [32].

## **2.3 Sistemas de Almacenamiento de energía**

La incorporación de energía renovable crece desmedidamente restándole lugar a energías no renovables, y por ende estudios y tecnologías se desarrollan para mejorar su rendimiento, confiabilidad, seguridad y flexibilidad [33]. Sin embargo, la fuente de estas energías son variables e intermitentes influenciadas por aspectos ambientales y físicos del medio, condiciones incontrolables como la radiación o la velocidad del viento pueden causar la pérdida de estabilidad del sistema [34].

Los sistemas eléctricos de potencia funcionan en base a lineamientos y a un balance, su comportamiento es dinámico debido a la variación de la carga por lo que la generación debe estar disponible para responder con la transmisión el suministro de energía para que no exista desabastecimiento; frente a la conducta de los usuarios en el sistema de absorber energía de manera variable la acción requerida es optar por mecanismos para

mitigar posibles desbalances, una de las posibles soluciones, que se estudia en este trabajo, son los sistemas de almacenamiento [35].

Los sistemas de potencia trabajan absorbiendo energía directamente de la red cuando se presenta una perturbación debe existir un método de compensación de otra fuente, es aquí donde los sistemas de almacenamiento actúan devolviendo la energía que acumulan a la red en las crestas de consumo y la unidad generadora puede volver a estar en marcha u otra fuente del sistema sin interrumpir el servicio [36]. En base a lo descrito, se deduce que disponer de fuentes de conservación de energía se puede [37]:

- Acumular por un tiempo determinado energía eléctrica para posteriormente ser usada.
- Equilibrar la oferta y la demanda.
- Gestionar la transmisión, distribución y a la demanda.
- Dar seguridad y confiabilidad al sistema de potencia.

Los sistemas de almacenamiento son de rápida respuesta, permiten coordinar los recursos de energía, tradicionalmente las reservas hidráulicas que comúnmente son los sistemas de bombeo o embalses representan geográfica y económicamente un inconveniente, pero existen innovadores sistemas de almacenar energía, operaciones y técnicas, para posteriormente transformar y transportar el suministro de energía eléctrica a la demanda conservando un balance de energía en los sistemas eléctricos [38].

### **2.3.1 Métodos de almacenamiento de energía.**

La energía eléctrica actualmente se almacena de forma potencial o cinética,



el proceso consiste en tomar energía para almacenarla y entregarla de una misma forma o en la que se requiera, en este caso de estudio en energía eléctrica, la Tabla 1 que a continuación se presenta, se sintetiza en general los tipos tecnologías para almacenamiento de energía eléctrica y su dependencia con la fuente que utiliza [39].

Tabla 1. Tecnologías de almacenamiento de energía [40].

Origen	Tecnología
ENERGÍA CINÉTICA	<b>Térmica:</b> Aprovecha la variación de calor de un proceso para conducir los excedentes a una sustancia para almacenamiento, posteriormente liberar dentro del mismo proceso u otro la energía en horas pico y no requerir repotenciar o requerir de otra central de generación.
	<b>Eléctrica:</b> Son superconductores electrostáticos se basan en la carga y descarga en lapsos de tiempo muy cortos como un capacitor, son adecuados para responder ante picos de potencia o perturbaciones de mínima duración por su capacidad limitada.
	<b>Magnética:</b> Son reserva rodante de un sistema, utilizan el campo magnético como un inductor, acumulan energía por indeterminado tiempo como corriente circulatoria, la descarga es inmediata en cambios bruscos de voltaje [41].
	<b>Mecánica:</b> Funcionan por energía rotatoria y un volante de inercia como un motor eléctrico, así almacenan energía siendo una batería mecánica [42].
ENERGÍA POTENCIAL	<b>Mecánica:</b> Representan embalses de centrales hidroeléctricas, utilizan el bombeo para hacer reversible el proceso, disponen de un embalse superior e inferior para turbinar y generar energía en épocas de estiaje o alto consumo.
	<b>Aire comprimido:</b> Almacenan aire comprimido en depósitos profundos y en picos de demanda se libera sobre la turbina del generador [43].
	<b>Electroquímica:</b> Se almacenan por reacciones químicas en celdas que producen un voltaje y corriente y pueden descargarse en base a la necesidad.
	<b>Química:</b> Absorbe los excedentes de electricidad, con agua genera electrolisis y se almacena en celdas de combustible.

Todas las tecnologías descritas permiten almacenar energía eléctrica para salvaguardar la seguridad y continuidad del suministro, y su aplicación sobresale cuando se trata de la producción con energía renovable por la inestabilidad del recurso tratando de mitigarlo; además, tienen un nivel de eficiencia, un importe económico que dependiendo del sistema en que se va a incorporar se considera en el despacho, por este motivo en el presente estudio se profundizará sobre el uso de baterías en la producción de energía renovable [44].

### 2.3.2 Impacto y utilidad de los sistemas de almacenamiento en la generación.

El impacto es significativo en la generación principalmente el almacenamiento actúa como un regulador, una unidad en el despacho de potencia, mitiga las perturbaciones en el sistema dependiendo de los requerimientos de capacidad para mantener la calidad del suministro [45].

En fin, el impacto de los sistemas de almacenamiento genera beneficios, puntualizándolos así:

- La energía entregada por los sistemas de almacenamiento reduce la incertidumbre de los recursos renovables ofreciendo al sector estabilidad aplanando la curva de demanda.
- Reduce el uso de combustibles contaminantes al mejorar la eficiencia de la generación renovable.
- Absorbe energía en periodos de bajo consumo o utilizando excedentes para liberarlos en horas pico o en perturbaciones que desestabilicen al sistema.
- Al priorizar el despacho de energía renovable significa la minimización

de costos de operación y mantenimiento.

## 2.4 Generación con energía renovable integrando almacenamiento con baterías

La actual inserción de energías renovables principalmente solar y eólica en los sistemas eléctricos de potencia con almacenamiento de energía con baterías son el camino para transformar el sector energético en uno más confiable, seguro, no contaminante y económico [46]. Un ejemplo son los países europeos y EEUU, que han implementado baterías para fortalecer el crecimiento de las energías renovables que ha permitido disminuir la congestión del sistema y el uso de combustibles, como lo expresa en [47].

Los excedentes de energía limpia son aprovechados por los sistemas de baterías para garantizar un permanente suministro de electricidad, balancear el sistema y reforzando el campo de la energía renovable, en la Figura 4 se describe las características que impulsan este sistema de almacenamiento.

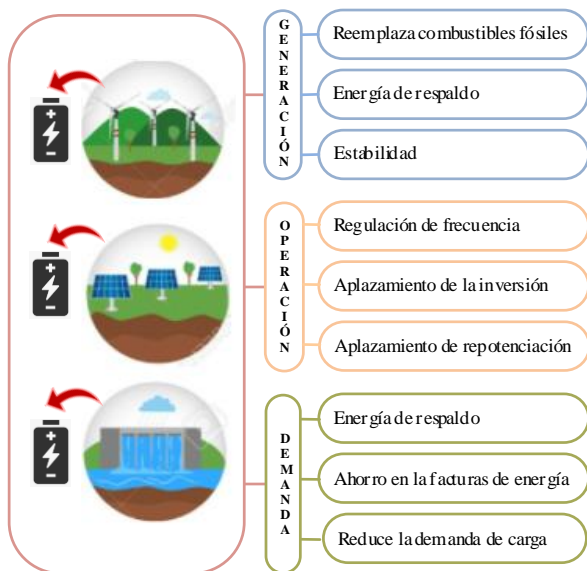


Figura 4. Ventajas del almacenamiento de energía con baterías [47].

El funcionamiento de un banco de baterías para almacenamiento tiene un rendimiento de 90%, se fundamenta en la absorción de energía eléctrica, pasando por una reacción electroquímica produciendo corriente entre los electrodos para recargarse y está lista para despachar energía en el momento requerido. Para clasificación de las baterías se considera su capacidad, vida útil, dimensión, costos, etc [48]. La tecnología más desarrollada es la de plomo - ácido con un rendimiento del 75%, seguidamente la reemplaza la de níquel - cadmio de menor rendimiento, pero es menos contaminante, de menor costo, pero la batería que reemplaza a ambas y es la de mayor uso es la de ion - litio que sobresale en sus características técnicas, pero sigue siendo un desafío alcanzar una máxima eficiencia [49].

La caracterización de las baterías permite comprender su funcionamiento, los conceptos técnicos más importantes para el cálculo e incorporación de los sistemas son [50], [51]:

- Estado de carga o SOC: es el porcentaje que manifiesta la máxima carga de la batería o energía posible que alcanza al absorber energía eléctrica.
- Profundidad de descarga DOD: es el porcentaje que se obtiene de la razón entre la capacidad liberada por la batería cuando se descarga y la capacidad de la batería, cuando la descarga aumenta la carga menor.
- Voltaje en vacío: cantidad de voltaje cuando en sus terminales no exista un consumo de energía.
- Voltaje en circuito cerrado: es el nivel de voltaje medido cuando se aplica una carga de consumo en los terminales de la batería.
- Resistencia interna: es el nivel de resistencia que se produce en la composición química interna de la batería y se calcula basándose en

SOC, DOD y la corriente entregada por la batería.

Se considera estos conceptos debido a que dentro del despacho económico la formulación de carga y descarga se considera para conocer el nivel de carga y la cantidad de energía que entregara en base a la descarga de energía de la batería al sistema [52]. Por lo señalado la integración de sistemas de almacenamiento de energía con baterías (SAEB) mitiga los riesgos del uso de energía renovable amortiguando la variabilidad del recurso y atenuando el uso de la misma, ahora el sistema es híbrido por su estructura y se vincula a todas las formas de energía abasteciéndose de los excedentes o en horas de bajo consumo, pero lo óptimo es que acompañen a las plantas fotovoltaicas, eólicas, hidráulicas para aprovechar energías limpias e inagotables, se acoplan por medio de un punto común y la carga como la descarga ocurre por medio de un convertidor [53].

Para el presente estudio se desarrolla un modelo y análisis con la implementación de un SAEB acoplado al sistema eléctrico de potencia que mediante un despacho económico dinámico se evalúa como el consumo de energía renovable con SAEB es predominante con respecto al no renovable [54]. La utilización de baterías como sistema de almacenamiento en el despacho económico utiliza la caracterización de las baterías denominado SOC o estado de carga el cual debe estar dentro de ciertos límites de carga y descarga o DOD, con el objeto de no degradar su vida útil, en este sentido el sistema de almacenamiento de energía toma energía del sistema para su carga cuando el costo horario marginal del sistema es económico para el abastecimiento de la demanda o cuando

hay excedentes y se carga hasta los límites máximos del estado de carga, posteriormente el sistema de almacenamiento entrega al sistema su energía de manera horaria cuando los costos marginales del sistema son elevados y su descarga es efectuada hasta los límites inferiores del estado de descarga DOD, una vez descargadas el sistema de almacenamiento de energía procede a realizar el mismo proceso de carga y descarga como una retroalimentación, es decir es un proceso cíclico durante la operación del sistema; esto conlleva a la optimización del recurso renovable en horas cuando existe un pico de consumo de la demanda es y almacenar energía cuando el consumo es mínimo, por esta razón es eficiente y necesario la implementación de la modelación presentada de este sistema híbrido de estudio a un nivel operativo [55]–[57].

### 3 Modelado matemático

A continuación, se describe la formulación matemática que se asocia a un problema de optimización, cuyo resultado determinará el despacho económico del parque de generación, considerando la aplicación de sistemas de almacenamiento de energía y su relación con el uso eficiente de la energía de las fuentes renovables, a fin de minimizar los costos operativos del sistema.

Este modelo, resuelto al aplicar el software GAMS, permitirá precisar la potencia horaria a ser despachada por los generadores durante un periodo de 24 horas, considerando la energía proveniente de fuentes renovables y el sistema de almacenamiento de energía, aplicando las restricciones asociadas al abastecimiento de la demanda, pendientes de toma carga y descarga de los generadores, recurso primario de fuentes renovables y las prohibiciones asociadas a

la energía entregada y almacenada y los límites del sistema de almacenamiento.

### 3.1 Generalidades

La aplicación de la formulación matemática se apuntará a los siguientes aspectos de carácter general:

- Proporcionar la energía necesaria para cumplir con el abastecimiento de la carga en diferentes períodos de tiempo.
- Establecer la potencia despachada de forma horaria de los generadores en cada periodo de tiempo.
- Determinar el valor de la energía entregada y almacenada por el SAEB para la optimización del recurso energético.
- Evaluar los parámetros técnicos y económicos relacionados con el abastecimiento de la demanda tomando en consideración el despacho de cada tipo de generadores y los SAEB.

El estudio a realizarse considerará un sistema de generación que contiene diversas tecnologías como las hidráulicas, térmicas, eólicas y fotovoltaicas para abastecer la demanda por un período de 24 horas, tomando en cuenta la implementación de sistemas de almacenamiento de energía mediante baterías, en tal razón, la resolución del modelo brindará el aporte de potencia horaria de los generadores y del sistema de almacenamiento con el objeto de reducir los costos operativos totales.

La asignación de potencia de los diversos tipos de generadores, así como el aporte de los sistemas de almacenamiento permitirá el abastecimiento de la demanda, tomando en cuenta las restricciones operativas impuestas, entregando además variables del tipo continuo que determinan la potencia horaria despachada que cumple con

condiciones económicas en el abastecimiento de la demanda.

### 3.2 Formulación matemática

La modelación a desarrollarse es de carácter dinámico y corresponde a una programación cuadrática, mismo que está combinado por una función objetivo y las restricciones operacionales del parque generador y los sistemas de almacenamiento, cuyo detalle se presenta a continuación.

#### 3.2.1 Función objetivo

El objetivo del modelo de optimización corresponde a la minimización de costos de carácter operativo de las fuentes generadoras despachadas, incluyéndose la entrega y almacenamiento de energía a través de los SAEB. Por lo señalado, la formulación matemática corresponde a una ecuación cuadrática de costos aplicable para los generadores térmicos, adicional se incorpora en la función objetivo a los precios internacionales a ser remunerados la energía producida de los generadores que usan energía renovable no convencional, cuya formulación matemática corresponde a la siguiente:

$$\begin{aligned}
 & FO \\
 & = \left[ \sum_t^T \sum_{i=1}^I a \cdot P_{(i,t)}^2 + b \cdot P_{(i,t)} + c \right] \\
 & + \left[ \sum_t^T \sum_{w=1}^W P_{(w,t)} \cdot Precio_w \right] \\
 & + \left[ \sum_t^T \sum_{r=1}^R P_{(r,t)} \cdot Precio_r \right] \\
 & + \left[ \sum_t^T \sum_{h=1}^H P_{(h,t)} \cdot Precio_h \right] \\
 & + \left[ \sum_t^T \sum_{SAEB} P_{C(SAEB,t)} * P_{minm_t} \right] \\
 & - \left[ \sum_t^T \sum_{SAEB} P_{dc(SAEB,t)} * P_{maxm_t} \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

Donde:

$t$	Hora
$T$	Período de horas de análisis
$i$	Generador térmico i
$I$	Cantidad de generadores térmicos
$P_{(i,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente de generación de tipo térmico i en la hora t
$a$	Coefficiente de forma de la función cuadrática de costos de cada generador i
$b$	Coefficiente de desplazamiento de la función cuadrática de costos de cada generador i
$c$	Coefficiente de corte de la función cuadrática de costos de cada generador i
$w$	Generador eólico w
$W$	Cantidad de generadores eólicos
$r$	Generador fotovoltaico r
$R$	Cantidad de generadores fotovoltaico
$h$	Generador hidráulico H
$H$	Cantidad de generadores hidráulicos
$P_{(w,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente eólica w en la hora t
$P_{(r,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente fotovoltaica r en la hora t
$P_{(h,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente generadora hidroeléctrica h en la hora t
$P_{c(SAEB,t)}$	Potencia activa de carga del SAEB en la hora t
$P_{dc(SAEB,t)}$	Potencia activa de descarga del SAEB en el período t
$Precio_w$	Precio de energía de la fuente generadora eólica w
$Precio_r$	Precio de energía de la fuente generadora fotovoltaica r
$Precio_h$	Precio de energía de la

fuelle generadora  
hidroeléctrica h

$P_{minm_t}$	Mínimo precio de mercado en la hora t
$P_{maxm_t}$	Máximo precio de mercado en la hora t

### 3.2.2 Restricción de rampas de generación

Las pendientes o rampas de los generadores de tipo térmicos garantizan que la entrega o disminución de la energía horaria generada en cada hora de operación se alinee con las limitaciones técnicas propias de las maquinas, en tal sentido, las ecuaciones siguientes describen lo citado:

$$P_{(i,t)} - P_{(i,t-1)} \leq RUP_i \quad (2)$$

$$P_{(i,t-1)} - P_{(i,t)} \leq RD_i \quad (3)$$

Donde:

$P_{(i,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente de generación de tipo térmico i en la hora t
$P_{(i,t-1)}$	Potencia activa entregada por la fuente de generación de tipo térmico i en la hora t-1
$RUP_i$	Pendiente de toma de carga del generador térmico i
$RD_i$	Pendiente de descarga del generador térmico i

### 3.2.3 Restricción para cumplir balance energético

La restricción garantiza que la energía producida por los generadores y la entregada por el sistema de almacenamiento permita abastecer horariamente tanto la demanda como la energía tomada por el sistema de almacenamiento para mantenerla reservada considerando además el recurso primario de las energías renovables.

$$\begin{aligned} \sum_i P_{(i,t)} + \sum_w P_{(w,t)} + \sum_r P_{(r,t)} = \\ + \sum_h P_{(h,t)} + \sum_{SAEB} Pdc_{(SAEB,t)} \\ = D_{(t)} + \sum_{SAEB} Pc_{(SAEB,t)} \end{aligned} \quad (4)$$

Donde:

$P_{(w,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente eólica w en la hora t
$P_{(r,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente fotovoltaica r en la hora t
$P_{(h,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente generadora hidroeléctrica h en la hora t
$P_{(i,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente de generación de tipo térmico i en la hora t
$Pdc_{(SAEB,t)}$	Potencia de descarga del sistema de almacenamiento SAEB en el período t
$D_{(t)}$	Demanda de potencia activa en la hora t
$Pc_{(SAEB,t)}$	Potencia de carga del sistema de almacenamiento SAEB en el período t

### 3.2.4 Restricción de reserva rodante

El sistema de generación debe mantener la reserva rodante del sistema, con el objeto de se puedan solventar las desviaciones de la carga de potencia activa.

$$\begin{aligned} \sum_i P_{max(i,t)} + \sum_w P_{max(w,t)} \\ + \sum_r P_{max(r,t)} + \sum_h P_{max(h,t)} \\ = D_{(t)} * (1 + \%R) \end{aligned} \quad (5)$$

Donde:

$P_{max(w,t)}$	Máxima potencia activa de la fuente generadora eólica w
----------------	---

$P_{max(r,t)}$	en la hora t Máxima potencia activa de la fuente generadora fotovoltaica w en la hora t
$P_{max(i,t)}$	Máxima potencia activa de la generadora térmica i en la hora t
$P_{max(h,t)}$	Máxima potencia activa de la generadora hidráulica i en la hora t
$D_{(t)}$	Demanda en hora t
$\%R$	Porcentaje para la reserva del sistema

### 3.2.5 Restricción para límites de potencia de los generadores

El parque generador, en función a su constitución física y su tecnología, tiene restricciones operativas asociadas a la potencia horaria a ser entregada, en tal razón, la restricción que se muestra a continuación establece que la potencia despachada no supere los límites establecidos.

$$Pmin_{(i)} \leq P_{(i,t)} \leq Pmax_{(i)} \quad (6)$$

$$Pmin_{(w)} \leq P_{(w,t)} \leq Pmax_{(w)} \quad (7)$$

$$Pmin_{(r)} \leq P_{(r,t)} \leq Pmax_{(r)} \quad (8)$$

$$Pmin_{(h)} \leq P_{(h,t)} \leq Pmax_{(h)} \quad (9)$$

Donde:

$P_{(w,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente eólica w en la hora t
$P_{(r,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente fotovoltaica r en la hora t
$P_{(h,t)}$	Potencia activa entregada

	por la fuente generadora hidroeléctrica h en la hora t
$P_{(i,t)}$	Potencia activa entregada por la fuente de generación de tipo térmico i en la hora t
$P_{max(w,t)}$	Máxima potencia activa de la fuente generadora eólica w en la hora t
$P_{max(r,t)}$	Máxima potencia activa de la fuente generadora fotovoltaica w en la hora t
$P_{max(i,t)}$	Máxima potencia activa de la generadora térmica i en la hora t
$P_{max(h,t)}$	Máxima potencia activa de la generadora hidráulica i en la hora t
$P_{min(w,t)}$	Mínima potencia activa de la fuente generadora eólica w en la hora t
$P_{min(r,t)}$	Mínima potencia activa de la fuente generadora fotovoltaica w en la hora t
$P_{min(i,t)}$	Mínima potencia activa de la generadora térmica i en la hora t
$P_{min(h,t)}$	Mínima potencia activa de la generadora hidráulica i en la hora t

### 3.2.6 Restricción para la cuota energética hidráulica

Con el afán de poder evaluar el recurso energético hidráulico, la restricción establecerá una cuota energética diaria que establece la cantidad máxima de energía que las centrales del tipo hidráulico pueden entregar al sistema, cuya formulación matemática es la siguiente:

$$\sum_t^T \sum_{h=1}^H P_{(h,t)} \leq CE \quad (10)$$

Donde:

$P_{(h,t)}$	Potencia del generador hidráulico h en el período t
-------------	---

$CE$  Cuota energética diaria

### 3.2.7 Restricción relacionada al estado de carga del sistema de almacenamiento de energía

La restricción modela el valor horario del estado de carga, por su terminología en inglés “State Of Charge” (SOC), el cual es necesario para la integración de las energías renovables y además es necesario para no afectar la vida útil de las baterías, cuya formulación matemática es la siguiente:

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \left( P_{c(SAEB,t)} \cdot \varepsilon_{C_{SAEB}} - \frac{P_{dc(SAEB,t)}}{\varepsilon_{d_{SAEB}}} \right) \quad (11)$$

Donde:

$SOC_t$	Estado de carga en el período t
$SOC_{t-1}$	Estado de carga en el período t -1
$P_{c(SAEB,t)}$	Potencia de carga del SAEB en el período t
$P_{dc(SAEB,t)}$	Potencia de descarga del SAEB en el período t
$\varepsilon_{C_{SAEB}}$	Eficiencia del SAEB en la carga
$\varepsilon_{d_{SAEB}}$	Eficiencia del SAEB en la descarga.

### 3.2.8 Restricción relacionada a la potencia de carga/ descarga del sistema de almacenamiento de energía

La gestión del estado de carga es una parte importante del control de la integración de energías renovables mediante baterías. En el método

convencional, cuando el SOC se acerca al valor límite, la potencia de inyectada en la red es constante. En el caso del límite superior de SOC, la potencia inyectada se establece por encima de la salida del generador renovable para que el sistema de almacenamiento se descargue. En caso de límite inferior de SOC, la potencia objetivo constante se establece por debajo de la salida de los generadores con energía renovable para que sistema de almacenamiento se cargue. Por lo tanto, el SOC se gestiona mediante la carga/descarga del BESS, bajo este contexto la ecuación (11) en conjunto con las siguientes restricciones garantizan la gestión del estado de carga.

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max} \quad (12)$$

$$0 \leq Pc_{(SAEB,t)} \leq 0.2 \cdot SOC_{max} \quad (13)$$

$$0 \leq Pdc_{(SAEB,t)} \leq 0.5 \cdot SOC_{max} \quad (14)$$

Donde:

$SOC_t$	Estado de carga en el período t
$SOC_{min}$	Estado de carga mínimo
$Pc_{(SAEB,t)}$	Potencia de carga del SAEB en la hora t
$Pdc_{(SAEB,t)}$	Potencia de descarga del SAEB en la hora t
$SOC_{max}$	Estado de carga máximo

## 4 Implementación del Modelo Matemático

Con el afán de evaluar el modelo propuesto se empleará un parque de generación que consiste en 10 generadores de diversos tipos de tecnología y se incluirá un sistema de

almacenamiento para validar sus ventajas en el abastecimiento de la demanda, los parámetros que servirán de insumo para aplicar el modelo propuesto se muestran en los siguientes numerales.

### 4.1 Parámetros

El sistema de generación consiste en un total de diez (10) generadores de diferentes tipos de tecnologías los cuales tienen como objeto abastecer la carga en cada hora. La Tabla 2 y Tabla 3, muestran los datos técnicos los cuales fueron obtenidos de plantas tipo mostradas en [58].

Tabla 2. Datos técnicos las unidades térmicas e hidráulicas.

	<b>Pmin</b> (MW)	<b>Pmax</b> (MW)	<b>RU</b> (MW/h)	<b>RD</b> (MW/h)
<b>g1</b>	20	100	50	40
<b>g2</b>	20	300	100	100
<b>g3</b>	30	200	50	50
<b>g4</b>	20	100	50	50
<b>g5</b>	0	130	60	60
<b>g6</b>	0	170	75	50

Donde:

$P_{min}$	Mínima potencia activa
$P_{max}$	Máxima potencia activa
$RU$	Pendiente de toma de carga
$RD$	Pendiente de descarga
$g$	Índice de la fuente generadora

Tabla 3. Parámetros técnicos de la generación con energía renovable.

	<b>Pmin</b> (MW)	<b>Pmax</b> (MW)	<b>Rampas</b> (MW/h)
<b>g7</b>	0	170	Depende del recurso primario
<b>g8</b>	0	180	
<b>g9</b>	0	60	
<b>g10</b>	0	75	

Las tecnologías de los generadores se esbozan en la Tabla 4.



Tabla 4. Asignación de tecnología del sistema de generación.

Tecnología	
<b>g1</b>	Térmica
<b>g2</b>	Térmica
<b>g3</b>	Térmica
<b>g4</b>	Térmica
<b>g5</b>	Hidráulico
<b>g6</b>	Hidráulico
<b>g7</b>	Eólico
<b>g8</b>	Eólico
<b>g9</b>	Fotovoltaico
<b>g10</b>	Fotovoltaico

Por otro lado, para generar funciones de costos y precios de producción de energía de los generadores usados en la modelación, se establece los coeficientes correspondientes a cada tipo de generador, los valores se muestran en la Tabla 5. Para los generadores térmicos los coeficientes se detallan en [58], mientras que el precio usado en la modelación de los generadores cuya tecnología se basa en energía renovable se sujeta a los precios promedios obtenidos en informes de la International Renewable Energy Agency (IRENA) [59].

Tabla 5. Coeficientes de cada generador para función de costos.

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>
g1	0.12	148.0	89
g2	0.17	165.7	83
g3	0.15	155.5	100
g4	0.19	132.1	70
g5	0	45.54	0
g6	0	54.58	0
g7	0	61.05	0
g8	0	73.23	0
g9	0	46.81	0
g10	0	50.51	0

Adicional, a fin de modelar el sistema de almacenamiento, se usa los parámetros de la Tabla 6 detallados en [60].

Tabla 6. Parámetros del SAEB.

Parámetro	Valor
$SOC_0$	100 MW
$SOC_{MAX}$	300 MW
$P_{max}^d$	0.2 $SOC_{MAX}$
$P_{min}^d$	0
$P_{max}^c$	0.5 $SOC_{MAX}$
$P_{min}^c$	0
$\varepsilon_C$	95%
$\varepsilon_D$	90%

Por otra parte, a fin de modelar el recurso primario de los generadores que usan recursos renovables, se presentan los factores de uso para las centrales fotovoltaicas y eólicas los cuales se encuentran tabulados en la Tabla 7 y mostrados de forma gráfica en la Figura 5, los cuales corresponden a los establecidos en el Plan Maestro de Electricidad [61].

Tabla 7. Factores de uso de los generadores que usan recursos renovables.

Tiempo	Eólico1	Eólico2	PV1	PV2
t1	0.99	0.08	0	0
t2	0.93	0.09	0	0
t3	0.89	0.12	0	0
t4	0.89	0.26	0	0
t5	0.91	0.36	0	0
t6	0.94	0.57	0.01	0.014
t7	0.95	0.65	0.08	0.09
t8	0.96	0.57	0.1	0.13
t9	0.95	0.48	0.2	0.187
t10	0.89	0.55	0.4	0.54
t11	0.93	0.76	0.7	0.89
t12	0.95	0.71	1	0.97
t13	0.98	0.87	0.8	1
t14	0.95	0.93	0.7	0.689
t15	1	0.97	0.5	0.51
t16	0.81	1	0.08	0.213
t17	0.64	0.87	0.05	0.093
t18	0.62	0.67	0.04	0.066
t19	0.73	0.66	0	0.013
t20	0.81	0.56	0	0
t21	0.72	0.57	0	0
t22	0.68	0.56	0	0
t23	0.75	0.72	0	0
t24	0.94	0.84	0	0

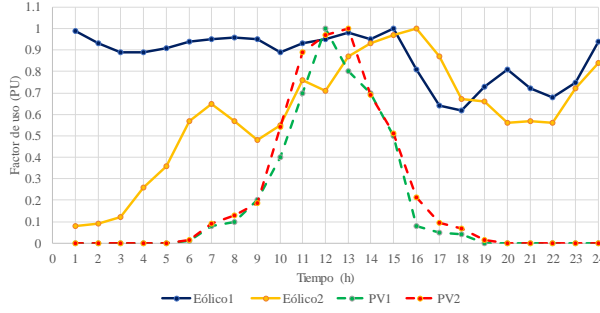


Figura 5. Factores de uso de los generadores que usan recursos renovables.

Considerando los parámetros antes descritos, se procederá con la incorporación en la modelación matemática del problema de optimización, el cual corresponde a una programación no lineal que por sus siglas corresponde a PNL.

## 4.2 Procedimiento de resolución

Para resolver el modelo matemático se procederá de manera inicial en la adquisición de datos y parámetros de carácter técnico y comercial del sistema modelo, para posteriormente desarrollar y resolver la modelación correspondiente considerando las restricciones y función objetivo. Como resultado, se obtendrá el despacho horario de los generadores, incluyéndose además la participación del sistema de almacenamiento, estableciéndose además los estados de carga, así como el aporte de sistema de almacenamiento a la demanda. En la Tabla 8 se pormenoriza el algoritmo correspondiente.

Tabla 8. Algoritmo de resolución.

<b>Paso 1:</b>	Adquisición de datos y parámetros técnicos del sistema a ser modelado. $G = [G1, G2, G n]$
<b>Paso 2:</b>	Determinación de la Demanda horaria $D = [Dem1, Dem2, \dots, Dem-24]$
<b>Paso 3:</b>	Adquisición de los coeficientes de la función de costos de cada generador. Set valores de probabilidad de ocurrencia del recurso primario
<b>Paso 4:</b>	(factores de uso)

**Paso 5:** Set de los parámetros técnicos del SAEB.

**Paso 6:** Problema de Optimización  
Set Condiciones iniciales  
Set Variables continuas

$$P_{(i,t)}, P_{(w,t)}, P_{(r,t)}, P_{(h,t)}$$

Función Objetivo

$$\begin{aligned}
 FO &= FO \\
 &= \left[ \sum_t \sum_{i=1}^I a \cdot P_{(i,t)}^2 + b \cdot P_{(i,t)} + c \right] \\
 &+ \left[ \sum_t \sum_{w=1}^W P_{(w,t)} \cdot Precio_w \right] \\
 &+ \left[ \sum_t \sum_{r=1}^R P_{(r,t)} \cdot Precio_r \right] \\
 &+ \left[ \sum_t \sum_{h=1}^H P_{(h,t)} \cdot Precio_h \right] \\
 &+ \left[ \sum_t \sum_{SAEB} P_{C(SAEB,t)} * Pmin_t \right] \\
 &- \left[ \sum_t \sum_{SAEB} P_{dc(SAEB,t)} * Pmax_t \right]
 \end{aligned}$$

Set Restricciones

$$\begin{aligned}
 P_{(i,t)} - P_{(i,t-1)} &\leq RUP_i \\
 P_{(i,t-1)} - P_{(i,t)} &\leq RD_i \\
 \sum_i P_{(i,t)} + \sum_w P_{(w,t)} + \sum_r P_{(r,t)} \\
 &+ \sum_h P_{(h,t)} \\
 &+ \sum_{SAEB} P_{dc(SAEB,t)} \\
 &= D_{(t)} \\
 &+ \sum_{SAEB} P_{C(SAEB,t)} \\
 \sum_i P_{max(i,t)} + \sum_w P_{max(w,t)} \\
 &+ \sum_r P_{max(r,t)} \\
 &+ \sum_h P_{max(h,t)} \\
 &= D_{(t)} * (1 + \%R) \\
 Pmin_{(i)} &\leq P_{(i,t)} \leq Pmax_{(i)} \\
 Pmin_{(w)} &\leq P_{(w,t)} \leq Pmax_{(w)} \\
 Pmin_{(r)} &\leq P_{(r,t)} \leq Pmax_{(r)} \\
 Pmin_{(h)} &\leq P_{(h,t)} \leq Pmax_{(h)}
 \end{aligned}$$

$$\sum_t^T \sum_{h=1}^H P_{(h,t)} \leq CE$$

$$SOC_t = SOC_{t-1} + \left( P_{c(SAEB,t)} \cdot \varepsilon_{cSAEB} - \frac{P_{dc(SAEB,t)}}{\varepsilon_{dSAEB}} \right)$$

$$SOC_{min} \leq SOC_t \leq SOC_{max}$$

$$0 \leq P_{c(SAEB,t)} \leq 0.2 \cdot SOC_{max}$$

$$0 \leq P_{dc(SAEB,t)} \leq 0.5 \cdot SOC_{max}$$

**Paso 7** Análisis de resultados por casos de estudio

**Paso 8** Fin

### 4.3 Casos de estudio

Con el fin de poder validar la utilidad del Despacho económico dinámico integrando Sistemas de Almacenamiento de Energía (SAE), se simularán dos casos, el primero tiene como finalidad abastecer la demanda con los generadores disponibles de distintas tecnologías, sujetándose a las restricciones respectivas para minimizar los costos operativos del sistema.

El segundo caso considerará el abastecimiento de la demanda incluyéndose, a más de los generadores disponibles, la participación del sistema de almacenamiento.

Para la resolución de los dos casos de estudio, se establece una cuota energética de los generadores hidráulicos equivalente a un 60% de la energía que puede ser producida por dichos generadores, es decir se modelará un escenario lluvioso medio. Adicional, el porcentaje de reserva corresponderá al 10%, mientras que el máximo y mínimo precio del mercado corresponderá al máximo y mínimo costo variable en cada hora, respectivamente.

El proceso de resolución inicia con la obtención de: i) los parámetros técnicos y económicos del parque generador; ii) la demanda hora a hora a ser abastecida durante 24 horas; iii) la incertidumbre del recurso para las fuentes de generación renovables; y, iv) los datos técnicos del

sistema de almacenamiento. Con los datos obtenidos se resuelve el problema matemático.

Los casos a ser analizados usarán la demanda horaria, la cual corresponde a los valores que se muestran en la Tabla 9 y mostrados en la Figura 6.

Tabla 9. Demanda horaria.

Tiempo	Demanda (MW)
t1	510
t2	530
t3	516
t4	510
t5	515
t6	544
t7	646
t8	686
t9	741
t10	734
t11	748
t12	760
t13	754
t14	700
t15	686
t16	720
t17	714
t18	761
t19	727
t20	714
t21	618
t22	584
t23	578
t24	544

En la Figura 6 se muestra que la demanda de potencia horaria, cuyo valor máximo asciende a 760 MW, una demanda media de 618 MW y una demanda valle 510 MW, la cual será abastecida considerando los aspectos descritos para cada caso de análisis.

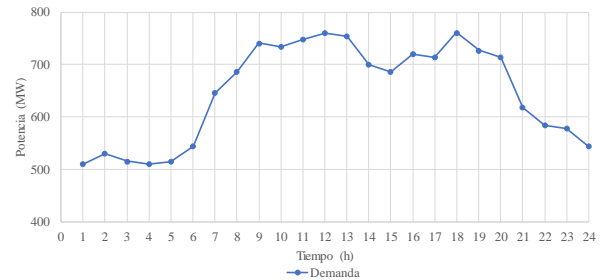


Figura 6. Demanda horaria.

A fin de determinar el valor de la cuota energética a usar, se procede a usar la siguiente formulación matemática:

$$CE = \sum_h Pmax_h \cdot \Delta t \cdot fp \quad (15)$$

Donde:

$CE$	Cuota energética diaria
$Pmax_h$	Potencia máxima por central hidráulica h
$\Delta t$	Período de tiempo de análisis, para el caso 24 horas.
$fp$	Factor de planta equivalente al 60%

Considerando los datos presentados en los parámetros de las centrales hidráulicas y considerando la formulación matemática antes descrita, se obtiene una cuota energética cuyo valor asciende a 4320 MWh.

## 5 Análisis de resultados

En este acápite se evaluará desde el punto de vista técnico y económico los resultados obtenidos en cada uno de los dos casos de análisis, evaluando el primer caso considerando el abastecimiento de la demanda sin la incorporación del SAEB; y, posteriormente continuará el análisis del segundo caso el cual incorpora el SAEB para el abastecimiento de la demanda. Como se ha mencionado, para ambos casos la cuota energética de carácter hidráulico será la misma cuyo valor corresponde a 4320 MWh, según lo indicado anteriormente.

### 5.1 Caso uno

De conformidad a lo señalado en el proceso de resolución, se procede a aplicar el modelo de optimización, de lo cual se obtiene el despacho horario de los

distintos generadores para abastecer su demanda, determinándose además el costo operativo del sistema para el período de 24 horas, sin considerar el sistema de almacenamiento de energía, dichos resultados se presentan en Tabla 10.

Tabla 10. Despacho por tipo de tecnología.

	H	E	PV	T	Total
t1	134.87	182.70		192.43	510.00
t2	163.27	174.30		192.43	530.00
t3	150.67	172.90		192.43	516.00
t4	130.00	198.10		181.90	510.00
t5	130.00	219.50		165.50	515.00
t6	130.00	262.40	1.65	149.95	544.00
t7	163.52	278.50	11.55	192.43	646.00
t8	212.02	265.80	15.75	192.43	686.00
t9	274.64	247.90	26.03	192.43	741.00
t10	226.77	250.30	64.50	192.43	734.00
t11	151.92	294.90	108.75	192.43	748.00
t12	145.52	289.30	132.75	192.43	760.00
t13	130.00	323.20	123.00	177.80	754.00
t14	130.00	328.90	93.68	147.42	700.00
t15	130.00	344.60	68.25	143.15	686.00
t16	189.09	317.70	20.78	192.43	720.00
t17	246.19	265.40	9.98	192.43	714.00
t18	300.00	226.00	7.35	227.65	761.00
t19	290.69	242.90	0.98	192.43	727.00
t20	283.07	238.50		192.43	714.00
t21	200.57	225.00		192.43	618.00
t22	175.17	216.40		192.43	584.00
t23	130.00	257.10		190.90	578.00
t24	102.02	311.00		130.98	544.00

Donde:

$H$	Hidráulica.
$E$	Eólico.
$PV$	Fotovoltaica.
$T$	Térmica.

El despacho efectuado en tabulación previamente, se muestra de forma gráfica en la

Figura 7.

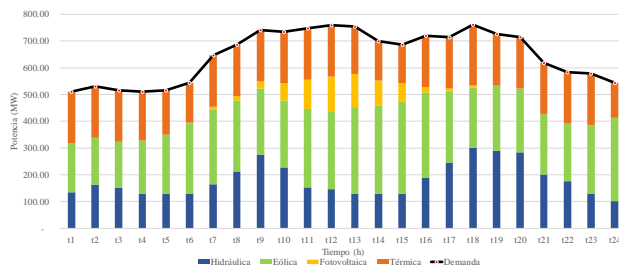


Figura 7. Despacho horario por tipo de tecnología.

De la Figura 7, se puede denotar que gran parte del aporte energético para el abastecimiento de la demanda proviene de las unidades de generación que usan energía renovable, tales como los hidroeléctricos, eólicos y fotovoltaicos, en tal sentido para evaluar la energía por tipo de tecnología se muestra los resultados de la Tabla 11.

Tabla 11. Energía entregada por tipo de tecnología.

	Energía (MWh)	Porcentaje
Hidráulica	4,320.00	28%
Eólica	6,133.30	39%
Fotovoltaica	684.98	4%
Térmica	4,401.72	28%
<b>Total</b>	<b>15,540.00</b>	

De la Tabla 11 se observa que el 72% de energía corresponde a la entregada por los generadores que usan energía renovable, desplazando de esa forma energía proveniente de generadores térmicos que son económicamente ineficientes. Los resultados energéticos se muestran en la Figura 8.

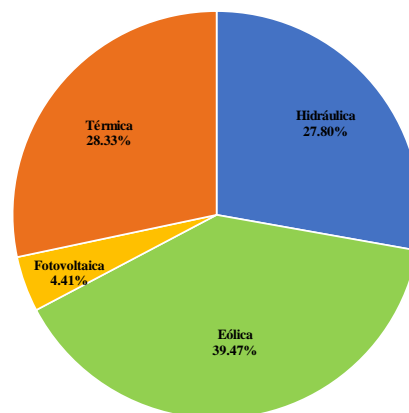


Figura 8. Porcentaje de participación energética por tecnología.

Considerando el abastecimiento energético antes detallado, se procede a determinar en la Tabla 12 el valor del costo del sistema por cada tipo de tecnología.

Tabla 12. Costos por tipo de tecnología.

	Costo (USD)	Porcentaje
<b>Hidráulico</b>	207,833.70	15.59%
<b>Eólico</b>	406,052.37	30.45%
<b>Fotovoltaico</b>	33,563.57	2.52%
<b>Térmico</b>	685,996.01	51.45%
<b>Total</b>	<b>1,333,445.65</b>	

Como se desprende de la Tabla 12, el costo total para abastecimiento de la demanda se compone por un 48.55% de la energía entregada por los generadores que usan recursos renovables, mientras un el 51.45% corresponde a la energía entregada por la generación térmica. Los valores se muestran en la Figura 9.

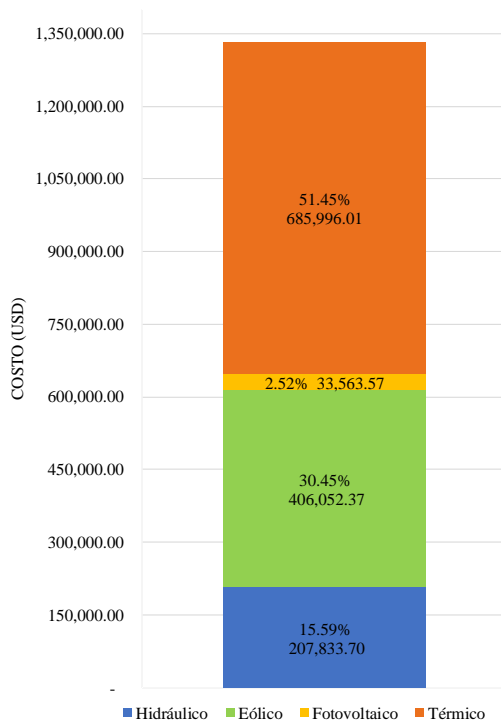


Figura 9. Costos del sistema por tecnología.

## 5.2 Caso dos

Como se ha mencionado, en el segundo caso el análisis se enfoca al abastecimiento de la demanda considerando, a más del parque generador, el Sistema de Almacenamiento de Energía (SAEB) obteniendo la potencia horaria que abastece la demanda y la que corresponde a la carga y descarga del SAEB.

Además, resultado de este despacho económico se observará la implicación en el costo operativo del sistema eléctrico de potencia. A continuación, también se presenta los resultados del despacho horario por tipo de tecnología que se incorpora y se integra también la potencia horaria asociada a la carga y descarga del sistema de almacenamiento de energía de baterías.

Tabla 13. Despacho por tipo de tecnología incluido SAEB.

	H	E	PV	T	SAEB_DC	SAEB_C
t1	188.38	182.70		198.92	0.00	-60.00
t2	216.78	174.30		198.92	0.00	-60.00
t3	68.05	172.90		137.47	137.58	-
t4	172.98	198.10		198.92	0.00	-60.00
t5	156.58	219.50		198.92	0.00	-60.00
t6	141.03	262.40	1.65	198.92	0.00	-60.00
t7	217.03	278.50	11.55	198.92	0.00	-60.00
t8	117.78	265.80	15.75	137.64	149.04	-
t9	300.00	247.90	26.03	227.07	0.00	-60.00
t10	280.28	250.30	64.50	198.92	0.00	-60.00
t11	57.90	294.90	108.75	137.47	148.98	-
t12	199.03	289.30	132.75	198.92	0.00	-60.00
t13	168.88	323.20	123.00	198.92	0.00	-60.00
t14	138.50	328.90	93.68	198.92	0.00	-60.00
t15	134.23	344.60	68.25	198.92	0.00	-60.00
t16	130.67	317.70	20.78	198.92	51.93	-
t17	299.70	265.40	9.98	198.92		-60.00
t18	190.47	226.00	7.35	198.92	138.26	-
t19	300.00	242.90	0.98	243.12	0.00	-60.00
t20	148.17	238.50		198.92	128.41	-
t21	254.08	225.00		198.92	0.00	-60.00
t22	228.68	216.40		198.92	0.00	-60.00
t23	80.83	257.10		137.47	102.60	-
t24	130.00	311.00		145.11	0.00	-42.1

Donde:

- $H$  Hidráulica.
- $E$  Eólico.
- $PV$  Fotovoltaica.
- $T$  Térmica.
- $SAEB_{DC}$  Potencia de descarga del SAEB.
- $SAEB_C$  Potencia de carga del SAEB.

El despacho antes tabulado, se muestra en la Figura 10.

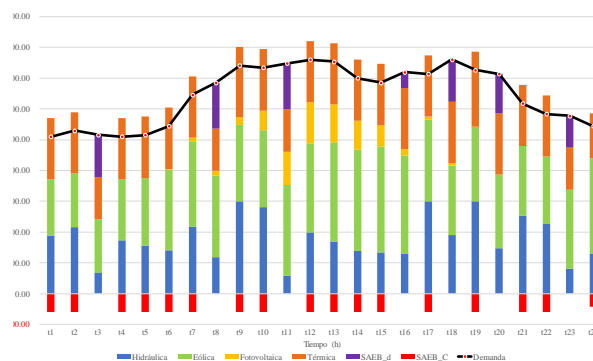


Figura 10. Despacho horario por tipo de tecnología incluido el SAEB

De la Figura 10 se muestra claramente los períodos horarios donde el SAEB adquiere y entrega energía. Para el caso puntual la energía tomada del sistema para cargar el SAEB corresponde a los valores negativos, mientras que los excedentes de generación, una vez abastecida la demanda, corresponde a la energía que el sistema brinda para la carga del sistema de almacenamiento. Resultado de lo cual se puede observar que la energía de los generadores térmicos tiende a incrementar su producción para poder tener la suficiente energía excedente que se usará posteriormente para almacenar la energía para que, en horarios de costos variables altos, se use la energía almacenada, los resultados energéticos son tabulados en la Tabla 14 y en la Figura 11 se observa gráficamente dichos resultados en bloques de energía.

Tabla 14. Energía por tipo de tecnología incluido SAEB.

	Energía (MWh)	Porcentaje
Hidráulica	4,320.00	27.80%
Eólica	6,133.30	39.47%
Fotovoltaica	684.98	4.41%
Térmica	4,547.03	29.26%
SAEB_DC	856.80	5.51%
SAEB_C	-1,002.11	-6.45%
<b>Total</b>	<b>15,540.00</b>	

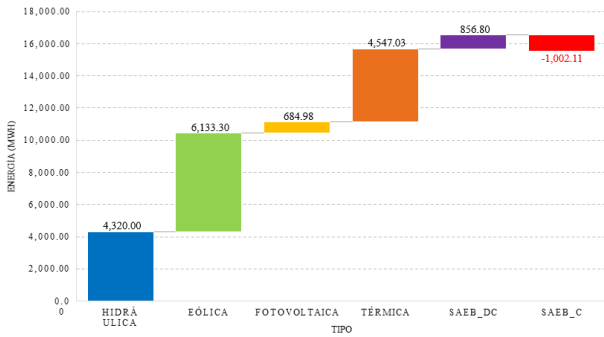


Figura 11. Bloques de energía destinados a la demanda con SAEB.

Como se puede observar de la Tabla 14, el 71,67% del abastecimiento corresponde a la energía entregada por parte de los generadores que usan recursos renovables, lo cual ocurre dado que este tipo de recurso energético ha llegado a sus límites. Por otra parte, la energía entregada por parte de los generadores térmicos, a comparación del caso anterior, asciende al valor del 29.28%, con el objeto de cargar el SAEB cuando el costo horario marginal del sistema es económicamente factible, para que posteriormente el SAEB entregue la energía almacenada al sistema cuando el costo marginal es alto. En el balance neto la energía entregada y consumida corresponde al abastecimiento completo de la demanda.

Así mismo, con el objeto de poder analizar los parámetros del SAEB se muestra el “Estado de Carga - SOC” en la Figura 12 y descarga del SAEB en la Figura 13.

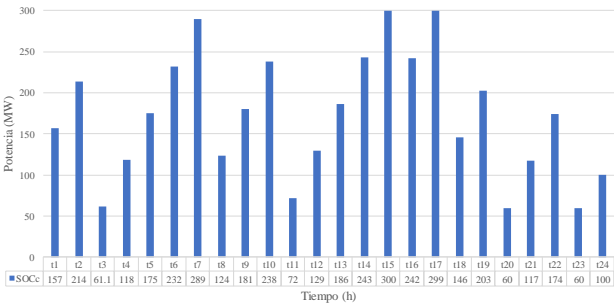


Figura 12. Estado de carga del SAEB

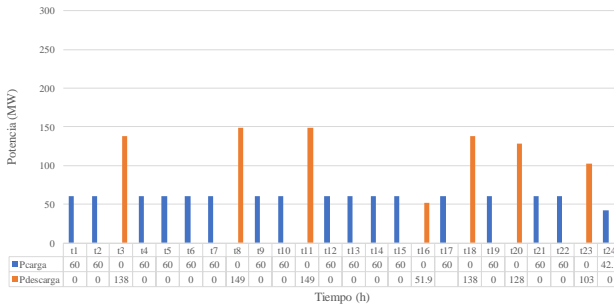


Figura 13. Carga y descarga del SAEB

Con el fin de evaluar económicamente la participación del SAEB en el sistema, se presenta en la Tabla 15 los costos por tipo de tecnología e igualmente se ilustra los resultados en bloques de energía en la Figura 14.

Tabla 15. Costos por tipo de tecnología incluido el SAEB.

	Costo (USD)	Porcentaje
Hidráulico	209,347.55	16.58%
Eólico	406,052.37	32.16%
Fotovoltaico	33,563.57	2.66%
Térmico	710,090.18	56.24%
Descarga	- 141,971.76	-11.24%
Carga	45,635.87	3.61%
<b>Total</b>	<b>1,262,717.78</b>	

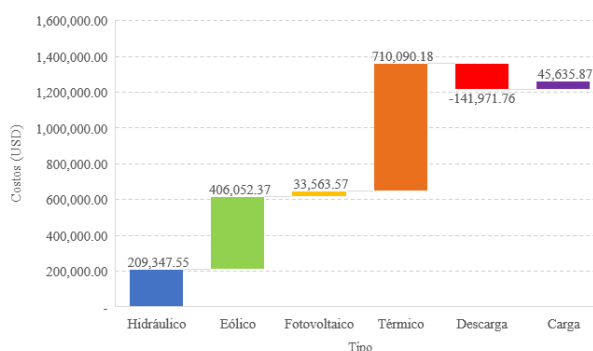


Figura 14. Costos por tipo de tecnología incluido el SAEB

De la Tabla 15 se concluye que el costo asociado a la carga del SAEB en periodos de tiempo donde el costo marginal es bajo, el costo es inferior con respecto a la minimización del costo del sistema cuando el SAEB entrega energía al sistema en periodos de tiempo donde el costo marginal es costoso, logrando de esta forma obtener un valor de 1,262,717.78 USD. A fin de evaluar el ahorro entre los dos casos, se presenta la Tabla 16 con la comparación de los costos.

Tabla 16. Costos por caso y ahorro.

Costos (USD)	
Caso Uno	1,333,445.65
Caso dos	1,262,717.78
<b>Ahorro-diario</b>	<b>70,727.87</b>
<b>Ahorro-anual</b>	<b>25,815,672.59</b>

De la Tabla 16 se puede observar que la implementación del SAEB produce un ahorro anual en el costo operativo al sistema que asciende aproximadamente a 25 MUSD, lo cual representa un importante descuento en relación al costo operativo sin SAEB, aspecto que válida y asegura la decisión de implementar los SAEB en los sistemas eléctricos que han implementado principalmente proyectos de generación con recursos renovables, ya que mitigan la incertidumbre del recurso primario y ayuda en el abastecimiento de la demanda minimizando los costos operacionales del sistema.

## 6 Conclusiones

Una vez efectuados los análisis en relación al tema propuesto en este trabajo, a continuación, se presentan los aspectos concluyentes a resaltar:

- El presente trabajo ha planteado y resuelto un modelo de optimización que determina el despacho económico dinámico integrando Sistemas de Almacenamiento de Energía mediante Batería (SAEB), considerando para el efecto un parque de generación con diversas tecnologías y la cuota energética que podría brindar las centrales del tipo hidráulico, obteniéndose la potencia horaria despachada y los costos asociados.
- El modelo de optimización propuesto minimiza los costos operativos del sistema de



generación, resultado de lo cual se obtiene el despacho de potencia horaria de los distintos generadores incluyéndose también el aporte que brinda el SAEB, cumpliendo las diferentes restricciones asociadas a los generadores, el SAEB y la reserva rodante del sistema, aspecto que se detalla dentro del acápite de análisis de resultados.

- Como resultado de los análisis energéticos y económicos se valida que el despacho económico dinámico integrando Sistemas de Almacenamiento de Energía mediante Batería (SAEB) es una herramienta válida para optimizar los recursos energéticos provenientes de los recursos renovables, permitiendo al SAEB almacenar energía en horas donde el costo marginal del sistema sea económico y entregar energía al sistema cuando el costo marginal del sistema sea elevado, dando como consecuencia una reducción en los costos operativos del sistema, lo cual profundiza que el uso de SAEB ayuda a minimizar las incertidumbres del recurso renovable, minimiza los costos del sistema y además puede desplazar la generación económica ineficiente que por lo general corresponde a la tecnología de tipo térmico.
- Del análisis efectuado y como ya se ha citado, el despacho económico dinámico integrando Sistemas de Almacenamiento de Energía mediante Batería (SAEB) conlleva a la optimización de los recursos energéticos principalmente cuando existen recursos renovables, minimizando los costos operativos, lo cual se ratifica en los resultados económicos mostrando una reducción de costos del 5%

ahorrándose el sistema un valor anual de alrededor de 25'000'000 USD, lo cual repercute en un ahorro a la demanda y se traduce en una reducción en las tarifas a los consumidores.

- Finalmente, se señala que la eficiencia en el despacho económico dinámico integrando SAEB depende de que el parque generador este conformado principalmente por generadores con recursos renovables, permitiendo de esta forma aumentar la participación del SAEB y bajo esta premisa se produce la optimización de los recursos minimizando costos excesivos producidos por generadores del tipo térmico. En tal sentido, la formulación propuesta puede considerarse como el sustento para la modelación de la integración de los SAEB en redes eléctricas aisladas o interconectadas.

## **6.1 Trabajos futuros**

Dado que el tema propuesto es innovador, se estima pertinente la realización de futuras investigaciones encaminadas a las siguientes temáticas:

- Despacho económico de energía renovable y su impacto en las redes eléctricas incluyendo la participación en los sistemas almacenamiento de energía.
- Implementación de los sistemas de almacenamiento de energía para proporcionar reservas de control primarias a los sistemas eléctricos.
- Ubicación óptima de sistemas de almacenamiento en las redes eléctricas de los sistemas de distribución.
- Determinación de la capacidad óptima de los sistemas de almacenamiento para la optimización del recurso renovable.

- Despacho multiobjetivo para la participación de los sistemas de almacenamiento y los recursos convencionales de generación considerando las limitaciones de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Modelo de optimización económica para abastecimiento de la demanda en sistemas eléctricos aislados.
- Despacho económico dinámico de micro redes híbridas con sistemas de almacenamiento de energía.

## 7 Referencias

- [1] Y. Zhang, H. H. Iu, S. Member, T. Fernando, and S. Member, "Cooperative Dispatch of BESS and Wind Power Generation Considering Carbon Emission Limitation in Australia," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 11, no. 6, pp. 1313–1323, 2015.
- [2] M. Khalid, "Wind Power Economic Dispatch – Impact of Radial Basis Functional Networks and Battery Energy Storage," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 36819–36832, 2019.
- [3] S. Wang, F. Yang, X. Bai, S. Liu, and C. Yue, "Optimal Power Dispatch Strategy for Multiple Battery Containers in a Grid-scale BESS Station," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1–5, 2019.
- [4] C. Jian, L. Yutian, and B. Guannan, "Optimal Operating Strategy for Distribution Networks with PV and BESS Considering Flexible Energy Storage," *IEEE Trans. Power Syst.*, no. 51507094, 2016.
- [5] G. V. Torres, "Almacenamiento con baterías para el Mercado eléctrico Chileno," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, 2019.
- [6] K. Alqunun and P. A. Crossley, "Rated Energy Impact of BESS on Total Operation Cost in a Microgrid," *IEEE Int. Conf. Neural Networks - Conf. Proc.*, pp. 292–300, 2016.
- [7] C. Nguyen and H. Lee, "Optimization of Power Dispatch to Minimize Battery Storage Capacity in Wind Farm," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 420–427, 2014.
- [8] S. A. R. Konakalla and R. A. De Callafon, "Optimal Hybrid Power Dispatch for Distributed Energy Resources with Dynamic Constraints," *IEEE Conf.*, pp. 125–130, 2017.
- [9] A. Abuelrub and C. Singh, "Long Term Energy Storage Capacity Optimization in Energy Buffer System," *IEEE Trans. Eng. Manag.*, pp. 1–5, 2014.
- [10] N. Kim, S. Member, H. Cha, S. Member, J. Seo, and D. Won, "SOC Management Algorithm of Battery Energy Storage System for PV Ramp Rate Control," *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2017.
- [11] H. Linjing and F. Yanjie, "Capacity Configuration Optimization and Operating Strategy Research on the Energy Storage Unit for Independent Wind / PV / Storage System," *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 4787–4791, 2015.
- [12] R. Yan and L. Yanpin, "Simulation and Optimization of Hybrid Wind-solar-pumped-storage Power System," *IEEE Conf.*, pp. 0–4, 2011.
- [13] F. R. Pazheri and M. F. Othman, "Environmental and Economic Power Dispatch for Hybrid Power System with Distributed Energy Storage," *Ieee Symp. Ind. Electron. Appl.*, pp. 117–121, 2013.
- [14] X. Li, L. Wang, N. Yan, and A. O. Function, "Economic Dispatch of

- Distribution Network with Distributed Energy Storage and PV Power Stations,” *IEEE Int. Conf. Neural Networks - Conf. Proc.*, no. 5, pp. 2020–2022, 2020.
- [15] C. Zhou and C. Zheng, “Economic Optimization Model of Islanded Microgrid Considering the Benefit of Energy Storage Charge and Discharge,” *IEEE Trans. Eng. Manag.*, pp. 839–844, 2020.
- [16] R. S. Wibowo, K. R. Firmansyah, N. K. Aryani, and A. Soeprijanto, “Dynamic Economic Dispatch of Hybrid Microgrid with Energy Storage Using Quadratic Programming,” *IEEE Power Energy Mag.*, no. 4, pp. 667–670, 2016.
- [17] J. Wang *et al.*, “Microgrid Optimal Dispatch Model Considering Energy Storage System,” *IEEE Conf.*, pp. 1665–1669, 2019.
- [18] A. Zeh, M. Müller, M. Naumann, H. C. Hesse, and A. Jossen, “Fundamentals of Using Battery Energy Storage Systems to Provide Primary Control Reserves in Germany,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol. IAEA*, no. September, 2016.
- [19] C. D. González, “Despacho económico de cargas en sistemas eléctricos de potencia: modelado, simulación y análisis,” *tesis*, 2017.
- [20] M. Keel, O. Liik, H. Tammoja, and M. Valdma, “Optimal planning of electric power generation in thermal power system,” *2005 IEEE Russ. Power Tech, PowerTech*, pp. 1–6, 2005.
- [21] S. Sui, Z. Pinchao, Q. Jun, X. Feo, Z. Yunhai, and L. Wei, “Optimization of Monthly Power Generation Plan for Thermal Power Units Considering Access of Large-scale New Energy,” *IEEE Trans. Power Syst.*, pp. 1812–1816, 2019.
- [22] J. Carrera, “Óptima Planificación de la expansión de generación eléctrica usando GAMS,” *Tesis*, vol. 1, pp. 66–80, 2017.
- [23] Y. Ding, C. Singh, and L. Goel, “Short-Term and Medium-Term Reliability Evaluation for Power Systems With High Penetration of Wind Power,” *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 3, pp. 896–906, 2014.
- [24] D. B. Fogel, “An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization,” *Ieee Trans. Neural Networks*, vol. 5, no. 1, 1994.
- [25] S. Slochanal, S. Kannan, and R. Rengaraj, “Generation expansion planning in the competitive environment,” *2004 11th Int. Conf. Harmon. Qual. Power (IEEE Cat. No.04EX951)*, no. November, pp. 21–24, 2004.
- [26] CENACE, “Planeación de operación de sistemas eléctricos de potencia,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 1, p. 4, 1999.
- [27] T. Guoqing, M. Ieee, L. I. U. Fubin, L. I. Yang, W. Bin, and F. U. Rong, “Risk-Based Assessment and Decision Making of Power System Security in Power Market,” *2014 IEEE Conf. Electr. Util. Deregulation, Restruct. Power Technol.*, no. April, pp. 551–555, 2004.
- [28] I. J. Percz-arriaga, J. Bogas, and D. E. Tecnológica, “A Nonlinear Programming Approach to Optimal Static Generation Expansion Planning,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 4, no. 3, pp. 1140–1146, 1989.
- [29] E. Gnansounou, J. Dong, S. Pierre, and A. Quintero, “Market Oriented Planning of Power Generation Expansion using Agent-based

- Model,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, no. 0041, pp. 1–6.
- [30] M. Musau, “Multi Area Multi Objective Dynamic Economic Dispatch with Renewable Energy and Emissions,” 2016.
- [31] C. Yingvivatanapong, W. J. Lee, and E. Liu, “Multi-area power generation dispatch in competitive markets,” *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 23, no. 1, pp. 196–203, 2008.
- [32] J. Zhu *et al.*, “Two stage approach for economic power dispatch,” *IEEE Power Energy Soc. 2008 Gen. Meet. Convers. Deliv. Electr. Energy 21st Century, PES*, vol. 1, 2008.
- [33] Z. Wang, D. Luo, and L. Zhang, “Research on the Active Power Coordination Control System for Wind/Photovoltaic/Energy Storage,” *IEEE Trans. Power Syst.*, p. 5, 2017.
- [34] F. A. Bhuiyan and A. Yazdani, “Energy storage technologies for grid-connected and off-grid power system applications,” *2012 IEEE Electr. Power Energy Conf. EPEC 2012*, pp. 303–310, 2012.
- [35] Y. Han, A. Jain, P. Young, and D. Zimmerle, “Robust Control of Microgrid Frequency with Attached Storage System,” *IEEE Conf.*, pp. 0–5, 2013.
- [36] M. Farhadi and O. Mohammed, “Energy storage systems for high power applications,” *IEEE Ind. Appl. Soc. - 51st Annu. Meet. IAS 2015, Conf. Rec.*, vol. 89, no. 12, 2015.
- [37] X. Zhou, Y. Lin, and Y. Ma, “The overview of energy storage technology,” *2015 IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. ICMA 2015*, pp. 43–48, 2015.
- [38] J. Guacaneme, D. Velasco, and C. Trujillo, “Review of Characteristics of Energy Storage Systems for Microgrid Applications.” pp. 40–53.
- [39] G. Cimuca, C. Saudemont, B. Robyns, and M. Radulescu, “Control and performance evaluation of a flywheel energy-storage system associated to a variable-speed wind generator,” *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 12, no. 4, pp. 201–211, 2012.
- [40] J. Ramos and M. Burgos, “Almacenamiento de Energía en Distribución Eléctrica,” *Tesis*, pp. 17–35, 2017.
- [41] R. T. Sataloff, M. M. Johns, and K. M. Kost, “Adaptive power supply for superconductive magnetic energy storage system,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, 1990.
- [42] R. Cárdenas, R. Peña, G. Asher, and J. Clare, “Control strategies for enhanced power smoothing in wind energy systems using a flywheel driven by a vector-controlled induction machine,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 3, pp. 625–635, 2001.
- [43] D. J. Swider, “Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 22, no. 1, pp. 95–102, 2007.
- [44] L. Wang, C. N. Li, Y. T. Chen, Y. T. Kao, V. V. V. V. Wang, “Study of a Hybrid Offshore Wind and Seashore Wave Farm Connected to a Large Power Grid through a Flywheel Energy Storage System,” *IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, 2011.
- [45] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, “Energy storage systems for transport and grid applications,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57,

- no. 12, pp. 3881–3895, 2010.
- [46] T. Xia, M. Li, P. Zi, L. Tian, X. Qin, and N. An, “Modeling and simulation of Battery Energy Storage System (BESS) used in power system,” *Proc. 5th IEEE Int. Conf. Electr. Util. Deregulation, Restruct. Power Technol. DRPT 2015*, pp. 2120–2125, 2016.
  - [47] IRENA, “El almacenamiento en baterías crecerá un 40% cada año hasta 2025 en los mercados emergentes - Energías Renovables, el periodismo de las energías limpias,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*
  - [48] L. Siguang and Z. Chengning, “Study on battery management system and lithium-ion battery,” *Proc. - 2009 Int. Conf. Comput. Autom. Eng. ICCAE 2009*, pp. 218–222, 2009.
  - [49] T. Chen and P. Pan, “The research of smart Li-ion battery managemnet,” *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 78–85, 2013.
  - [50] J. Matinez, “Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas,” *Tesis*, 2017.
  - [51] J. Guembe, I. San Martin, and J. Pascual, “Cálculo del estado de carga en baterías de plomo-ácido: diseño y validación experimental,” *Tesis*, 2016.
  - [52] S. Haider, H. Shahmoradi-Moghadam, J. O. Schonberger, and P. Schegner, “Algorithm and Optimization Model for Energy Storage Using Vertically Stacked Blocks,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 217688–217700, 2020.
  - [53] X. Liu, M. Ding, J. Han, P. Han, and Y. Peng, “Dynamic economic dispatch for microgrids including battery energy storage,” *2nd Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst. PEDG 2010*, no. 2, pp. 914–917, 2010.
  - [54] N. Javaid, G. Hafeez, S. Iqbal, N. Alrajeh, M. S. Alabed, and M. Guizani, “Energy Efficient Integration of Renewable Energy Sources in the Smart Grid for Demand Side Management,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 77077–77096, 2018.
  - [55] Q. Zhao, J. Wang, and Y. Han, “Multi-objective stochastic economic dispatch of power system with battery swapping stations,” *Chinese Control Conf. CCC*, vol. 2016-Augus, pp. 9930–9934, 2016.
  - [56] I. Iglesias, L. García-Tabarés, A. Agudo, I. Cruz, and L. Arribas, “Design and simulation of a stand-alone wind-diesel generator with a flywheel energy storage system to supply the required active and reactive power,” *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, vol. 3, pp. 1381–1386, 2000.
  - [57] F. Diaz-Gonzalez, F. D. Bianchi, A. Sumper, and O. Gomis-Bellmunt, “Control of a flywheel energy storage system for power smoothing in wind power plants,” *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 29, no. 1, pp. 204–214, 2014.
  - [58] Z. Jizhong and IEEE, “Optimization of Power System Operation,” 2015.
  - [59] Agency International Renewable Energy), *Renewable Power Generation Costs in 2019*. 2020.
  - [60] H. A. Kiehne, “Battery Technology Handbook,” *Batter. Technol. Handb.*, Aug. 2003.
  - [61] MERNNR, “Plan Maestro de Electricidad 2019-2027,” *Minist. Energía y Recur. No Renov.*, p. 390, 2019, [Online]. Available: <https://www.rekursosyenergia.gob.ec/plan-maestro-de-electricidad/>.

## 7.1 Matriz de Estado del Arte

Tabla 17. Matriz de estado del arte

DESPACHO ECONÓMICO DINÁMICO CONSIDERANDO LA INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (SAE) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL USO EFICIENTE DE ENERGÍA RENOVABLE																									
	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Despacho económico	Integración de fuentes de energía renovable	Costos de operación	Planificación de corto plazo	Sistemas de almacenamiento de energía	Implementación de modelos de optimización integrando sistemas de almacenamiento	Reducción de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Optimización de recursos de generación	Evaluación de las variables técnicas y económicas de los sistemas eléctricos	Estado de carga de los sistemas de almacenamiento	Balance energético	Restricciones operativas del parque generador y sistema de almacenamiento	Incertidumbre de recurso para las energías renovables	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Determinación de la potencia horaria de la generación y de los sistemas de almacenamiento	Determinación de la carga y descarga del sistema de almacenamiento	Determinación del estado de carga -SOC de los sistemas de almacenamiento	Modelo de optimización para el despacho económico dinámico	Despacho de las unidades de generación para abastecimiento de la demanda	Determinación de parámetros que validen la modulación del sistema	Evaluación técnica y económica por las transferencias de energía incluyendo generadores y los sistemas de almacenamiento	
1	2015	Cooperative Dispatch of BESS and Wind Power Generation Considering Carbon Emission Limitation in Australia	45					✖			✖				✖	✖				✖			✖		
2	2019	Wind Power Economic Dispatch – Impact of Radial Basis Functional Networks and Battery Energy Storage	10	✖		✖			✖			✖	✖			✖	✖	✖			✖	✖			✖
3	2019	Optimal Power Dispatch Strategy for Multiple Battery Containers in a Grid-scale BESS Station	0		✖		✖			✖				✖										✖	
4	2016	Optimal Operating Strategy for Distribution Networks with PV and BESS Considering Flexible Energy Storage	11					✖			✖							✖					✖		
5	2017	Almacenamiento con baterías para el Mercado eléctrico Chileno	0		✖					✖		✖			✖	✖									
6	2016	Rated Energy Impact of BESS on Total Operation Cost in a Microgrid	7		✖		✖					✖			✖	✖								✖	
7	2014	Optimization of Power Dispatch to Minimize Battery Storage Capacity in Wind Farm	10							✖					✖										
8	2017	Optimal Hybrid Power Dispatch for Distributed Energy Resources with Dynamic Constraints	0		✖			✖				✖										✖			
9	2014	Long Term Energy Storage Capacity Optimization in Energy Buffer System	8		✖		✖			✖				✖									✖	✖	

# **DESPACHO ECONÓMICO DINÁMICO CONSIDERANDO LA INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (SAE) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL USO EFICIENTE DE ENERGÍA RENOVABLE**

	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA					
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Despacho económico	Integración de fuentes de energía renovable	Costos de operación	Planificación de corto plazo	Sistemas de almacenamiento de energía	Implementación de modelos de optimización integrando sistemas de almacenamiento	Reducción de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Optimización de recursos de generación	Evaluación de las variables técnicas y económicas de los sistemas eléctricos	Estado de carga de los sistemas de almacenamiento	Balance energético	Restricciones operativas del parque generador y sistema de almacenamiento	Incertidumbre de recurso para las energías renovables	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Determinación de la potencia horaria de la generación y de los sistemas de almacenamiento	Determinación de la carga y descarga del sistema de almacenamiento	Determinación del estado de carga -SOC de los sistemas de almacenamiento	Modelo de optimización para el despacho económico dinámico	Despacho de las unidades de generación para abastecimiento de la demanda	Determinación de parámetros que validen la modelación del sistema	Evaluación técnica y económica por las transferencias de energía incluyendo generadores y los sistemas de almacenamiento	
10	2017	SOC Management Algorithm of Battery Energy Storage System for PV Ramp Rate Control	7					☒			☒							☒					☒		
11	2015	Capacity Configuration Optimization and Operating Strategy Research on the Energy Storage Unit for Independent Wind / PV / Storage System	0		☒		☒			☒				☒	☒	☒								☒	
12	2011	Simulation and Optimization of Hybrid Wind-solar-pumped-storage Power System	15	☒	☒	☒			☒		☒				☒	☒	☒			☒	☒		☒		
13	2013	Environmental and Economic Power Dispatch for Hybrid Power System with Distributed Energy Storage	5					☒			☒	☒							☒						☒
14	2020	Economic Dispatch of Distribution Network with Distributed Energy Storage and PV Power Stations	0		☒					☒		☒			☒	☒						☒			
15	2020	Economic Optimization Model of Islanded Microgrid Considering the Benefit of Energy Storage Charge and Discharge	0		☒		☒			☒		☒			☒	☒								☒	
16	2016	Dynamic Economic Dispatch of Hybrid Microgrid with Energy Storage Using Quadratic Programming	18	☒		☒								☒	☒								☒		
17	2019	Microgrid Optimal Dispatch Model Considering Energy Storage System	0					☒	☒					☒											
18	2016	Fundamentals of Using Battery Energy Storage Systems to Provide Primary Control Reserves in Germany	77	☒			☒				☒										☒	☒			
19	2017	Despacho económico de cargas en sistemas eléctricos de potencia: modelado, simulación y análisis	0				☒	☒													☒				

Despacho Económico Dinámico Considerando la Incorporación de Sistemas de Almacenamiento de Energía (SAE) en el Sistema Eléctrico para el Uso Eficiente de Energía Renovable																									
	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Despacho económico	Integración de fuentes de energía renovable	Costos de operación	Planificación de corto plazo	Sistemas de almacenamiento de energía	Implementación de modelos de optimización integrando sistemas de almacenamiento	Reducción de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Optimización de recursos de generación	Evaluación de las variables técnicas y económicas de los sistemas eléctricos	Estado de carga de los sistemas de almacenamiento	Balance energético	Restricciones operativas del parque generador y sistema de almacenamiento	Incertidumbre de recurso para las energías renovables	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Determinación de la potencia horaria de la generación y de los sistemas de almacenamiento	Determinación de la carga y descarga del sistema de almacenamiento	Determinación del estado de carga -SOC de los sistemas de almacenamiento	Modelo de optimización para el despacho económico dinámico	Despacho de las unidades de generación para abastecimiento de la demanda	Determinación de parámetros que validen la modelación del sistema	Evaluación técnica y económica por las transferencias de energía incluyendo generadores y los sistemas de almacenamiento	
20	2005	Optimal planning of electric power generation in thermal power system	2	✖		✖			✖		✖	✖		✖		✖	✖	✖			✖	✖			
21	2019	Optimization of Monthly Power Generation Plan for Thermal Power Units Considering Access of Large-scale New Energy	1		✖					✖				✖									✖	✖	
22	2017	Óptima Planificación de la expansión de generación eléctrica usando GAMS	0				✖	✖			✖							✖					✖		
23	2014	Short-Term and Medium-Term Reliability Evaluation for Power Systems With High Penetration of Wind Power	86	✖		✖			✖	✖			✖		✖									✖	✖
24	1994	An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization	2121	✖		✖					✖			✖	✖										
25	2004	Geneation expansion planning in the competitive environment	26					✖	✖					✖											
26	2020	Planeación de operación de sistemas eléctricos de potencia	0	✖			✖				✖										✖				
27	2004	Risk-Based Assessment and Decision Making of Power System Security in Power Market	7	✖				✖										✖							✖
28	1989	A Nonlinear Programming Approach to Optimal Static Generation Expansion Planning	63		✖					✖				✖									✖	✖	
29	2004	Market Oriented Planning of Power Generation Expansion using Agent-based Model	55				✖	✖			✖							✖					✖		
30	2016	Multi Area Multi Objective Dynamic Economic Dispatch with Renewable Energy and Emissions	12		✖			✖		✖		✖	✖		✖				✖	✖	✖	✖			
31	2008	Multi-area power generation dispatch in competitive markets	46	✖	✖		✖	✖	✖		✖			✖				✖		✖				✖	



# **DESPACHO ECONÓMICO DINÁMICO CONSIDERANDO LA INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (SAE) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL USO EFICIENTE DE ENERGÍA RENOVABLE**

	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA			ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA						
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Despacho económico	Integración de fuentes de energía renovable	Costos de operación	Planificación de corto plazo	Sistemas de almacenamiento de energía	Implementación de modelos de optimización integrando sistemas de almacenamiento	Reducción de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Optimización de recursos de generación	Evaluación de las variables técnicas y económicas de los sistemas eléctricos	Estado de carga de los sistemas de almacenamiento	Balance energético	Restricciones operativas del parque generador y sistema de almacenamiento	Incertidumbre de recurso para las energías renovables	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Determinación de la potencia horaria de la generación y de los sistemas de almacenamiento	Determinación de la carga y descarga del sistema de almacenamiento	Determinación del estado de carga -SOC de los sistemas de almacenamiento	Modelo de optimización para el despacho económico dinámico	Despacho de las unidades de generación para abastecimiento de la demanda	Determinación de parámetros que validen la modelación del sistema	Evaluación técnica y económica por las transferencias de energía incluyendo generadores y los sistemas de almacenamiento	
32	2008	Two stage approach for economic power dispatch	7	☒					☒	☒		☒			☒		☒	☒			☒				☒
33	2017	Research on the Active Power Coordinaion Control System for Wind/Photovoltaic/Energy Storage	17		☒					☒					☒								☒		☒
34	2012	Energy storage technologies for grid-connected and off-grid power system applications	62	☒		☒					☒			☒	☒										
35	2013	Robust Control of Microgrid Frequency with Attached Storage System	12						☒					☒											☒
36	2015	Energy storage systems for high power applications	13	☒			☒				☒										☒				☒
37	2015	The overview of energy storage technology	16	☒							☒										☒				
38	2018	Review of Characteristics of Energy Storage Systems for Microgrid Applications	189			☒			☒			☒		☒						☒		☒			
39	2006	Control and performance evaluation of a flywheel energy-storage system associated to a variable-speed wind generator	334	☒		☒		☒					☒		☒			☒	☒	☒			☒		☒
40	1992	Adaptative power supply for superconductive magnetic energy storage system	148			☒			☒			☒		☒						☒		☒			☒
41	2001	Control strategies for enhanced power smoothing in wind energy systems using a flywheel driven by a vector-controlled induction machine	175	☒			☒				☒										☒				
42	2007	Compressed air energy storage in an electricity system with significant wind power generation	282	☒		☒			☒		☒	☒		☒			☒	☒			☒	☒			

DESPACHO ECONÓMICO DINÁMICO CONSIDERANDO LA INCORPORACIÓN DE SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA (SAE) EN EL SISTEMA ELÉCTRICO PARA EL USO EFICIENTE DE ENERGÍA RENOVABLE																								
	DATOS			TEMÁTICA				FORMULACION DEL PROBLEMA				RESTRICCIONES DEL PROBLEMA				ALGORITMO DE RESOLUCIÓN				SOLUCIÓN PROPUESTA				
ITEM	AÑO	TÍTULO DEL ARTÍCULO	CITAS	Despacho económico	Integración de fuentes de energía renovable	Costos de operación	Planificación de corto plazo	Sistemas de almacenamiento de energía	Implementación de moddos de optimización integrando sis-temas de almacenamiento	Reducción de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Optimización de recursos de generación	Evaluación de las variables técnicas y económicas de los sistemas eléctricos	Estado de carga de los sistemas de almacenamiento	Balance energético	Restricciones operativas del parque generador y sistema de almacenamiento	Incertidumbre de recurso para las energías renovables	Minimización de costos operativos para abastecimiento de la demanda	Determinación de la potencia horaria de la generación y de los sistemas de almacenamiento	Determinación de la carga y descarga del sistema de almacenamiento	Determinación del estado de carga -SOC de los sistemas de almacenamiento	Modelo de optimización para el despacho económico dinámico	Despacho de las unidades de generación para abastecimiento de la demanda	Determinación de parámetros que validen la modelación del sistema	Evaluación técnica y económica por las transferencias de energía incluyendo generadores y los sistemas de almacenamiento
43	2011	Study of a Hybrid Offshore Wind and Seashore Wave Farm Connected to a Large Power Grid through a Flywheel Energy Storage System	13	✖			✖			✖				✖									✖	
44	2010	Energy storage systems for transport and grid applications	1263				✖	✖			✖							✖					✖	
45	2015	Modeling and simulation of Battery Energy Storage System (BESS) used in power system	17	✖	✖			✖	✖					✖				✖	✖		✖			✖
46	2009	Study on battery management system and lithium-ion battery	48		✖					✖				✖									✖	✖
47	2007	The research of smart Li-ion battery managemnet	16				✖	✖			✖							✖						
48	2020	Algorithm and Optimization Model for Energy Storage Using Vertically Stacked Blocks	0	✖		✖			✖			✖		✖		✖		✖			✖	✖		
49	2010	Dynamic economic dispatch for microgrids including battery energy storage	146		✖		✖			✖				✖									✖	✖
50	2018	Energy Efficient Integration of Renewable Energy Sources in the Smart Grid for Demand Side Management	66	✖				✖		✖		✖	✖		✖				✖		✖	✖		
51	2016	Multi-objective stochastic economic dispatch of power system with battery swapping stations	3		✖			✖	✖		✖			✖				✖	✖	✖	✖			✖
52	2000	Design and simulation of a stand-alone wind-diesel generator with a flywheel energy storage system to supply the required active and reactive power	73	✖			✖		✖	✖		✖			✖			✖	✖			✖		✖
53	2013	Control of a flywheel energy storage system for power smoothing in wind power plants,	115		✖					✖					✖								✖	✖
		CANTIDAD:	20	17	9	16	17		16	18	16	11	5	22	19	3	17	11	7	16	11	14	14	12

7.2 Resumen de Indicadores

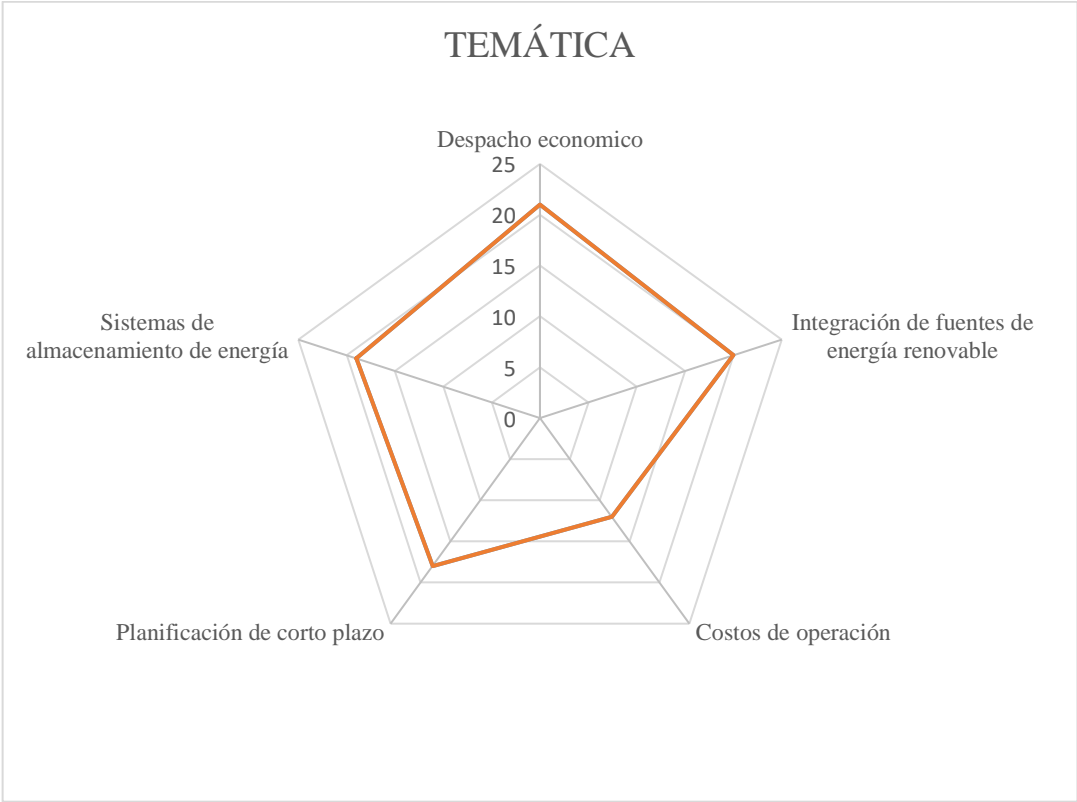


Figura 15. Resumen e indicador de la temática - Estado del arte.

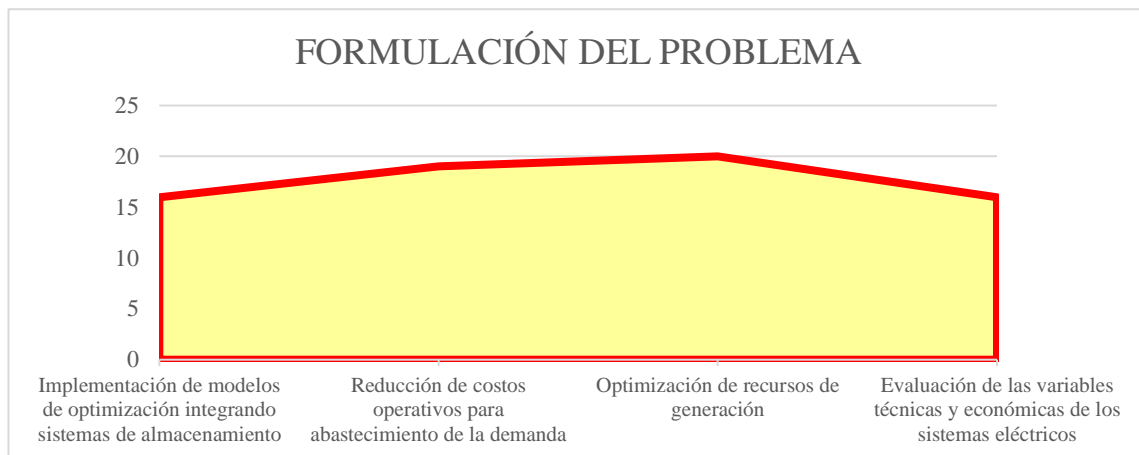


Figura 16. Indicador de formulación del problema - Estado del arte.

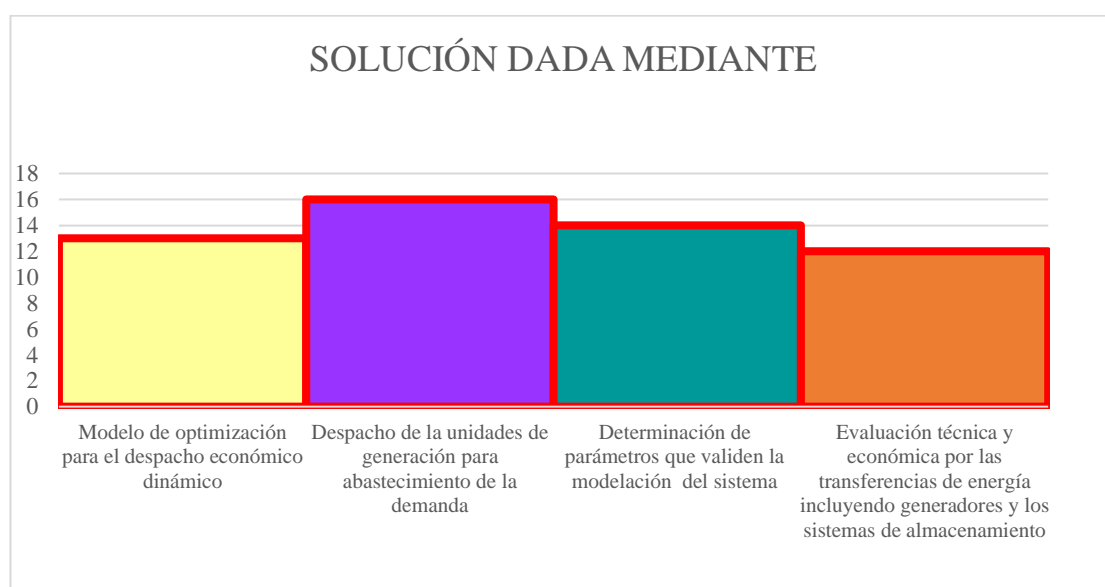


Figura 17. Indicador de solución - Estado del arte.